

ФИЗИКА

Ю.К. Стишков

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ



Санкт Петербургский государственный университет
Физический факультет
Научно образовательный центр «Электрофизика»

Ю.К. СТИШКОВ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Москва
ЮСТИЦИНФОРМ
2019

УДК 537:532/533(075.8)

ББК 22.338

С80

Рецензенты: Д.ф.м.н., проф. Ключарев А.Н. (СПбГУ)

Д.ф.м.н., проф. Павлов В.А. (СПбГУ)

Стишков Ю.К.

С80 Электрофизические процессы в жидкостях при воздействии сильных электрических полей : монография / Ю.К. Стишков. — М. : Юстицинформ, 2019. — 262 с.

ISBN 978-5-7205-1516-4

В монографии анализируются процессы проводимости, зарядообразования и структуры электрогидродинамических течений в жидких диэлектриках. Автор опирается в основном на результаты оригинальных исследований, проведенных в лаборатории электрофизики СПбГУ и опубликованных ранее в периодических изданиях и материалах научных конференций. В работе используются как результаты оригинальных экспериментов, так и результаты компьютерного моделирования. В заключении автор приводит краткие выводы, обобщающие изложенные в монографии научные результаты.

Монография представляет интерес для научных работников, занимающихся вопросами электрофизики и электрогидродинамики жидкостей, инженерам в области техники высоких напряжений и электроэнергетики, студента и аспирантам, специализирующимся в направлении электрофизики.

Ключевые слова: электрофизика, электрогидродинамика, жидкие диэлектрики, электрокондуктивный механизм, диссоационно-рекомбинационный механизм, электронейтральность, техника высоких напряжений, электроэнергетика

УДК 537:532/533(075.8)

ББК 22.338

ISBN 978-5-7205-1516-4

© Ю.К. Стишков, 2019

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СТРОЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ.	10
<i>Межмолекулярные силы [1.2].....</i>	<i>10</i>
<i>Молекулярная структура некоторых жидких диэлектриков[1.4].....</i>	<i>13</i>
<i>Насыщенные углеводороды.</i>	<i>13</i>
<i>Литература к главе 1.</i>	<i>18</i>
ГЛАВА 2. МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ.	19
<i>Вольтамперные характеристики «жидких диэлектриков» (экспериментальные данные).</i>	<i>21</i>
<i>Особенности характера вольтамперных характеристик и особенности высоковольтной проводимости очищенных жидких диэлектриков в сильно неоднородных электрических полях.....</i>	<i>28</i>
<i>Метод динамических ВАХ.</i>	<i>29</i>
<i>ДВАХ в сильно неоднородных электрических полях.</i>	<i>31</i>
<i>Влияние примесного состава жидкостей на характер ВАХ [2.5, 2.7].....</i>	<i>34</i>
<i>Зависимость характера ВАХ от материала электродов в изеооктане.....</i>	<i>39</i>
<i>Влияние степени неоднородности электрического поля на ВАХ в растворах йода в трансформаторном масле [2.5].</i>	<i>41</i>
<i>ДВАХ в симметричной системе электродов.</i>	<i>42</i>
<i>ДВАХ для несимметричных электродов типа игла-конфузор [2.14, 2.15].....</i>	<i>45</i>
<i>Исследование процессов старения активированных электродов</i>	<i>47</i>
<i>Старение активированных электродов, в изеооктане, находящемся в контакте с атмосферным воздухом.....</i>	<i>47</i>
<i>ДВАХ, обусловленные эффектом Вина [2.16-2.20].....</i>	<i>50</i>
<i>Литература к главе 2.</i>	<i>53</i>
ГЛАВА 3. ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В ЖИДКОСТЯХ С ИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ ПРОВОДИМОСТИ.....	55
<i>Ионно-обменный механизм образования заряда на границе металлический электрод-раствор.....</i>	<i>59</i>
<i>Структура двойного слоя.....</i>	<i>61</i>
<i>Упрощенная модель двойного диффузного слоя</i>	<i>61</i>
<i>Электрокондуктивный механизм образования заряда.....</i>	<i>63</i>
<i>Приэлектродные неравновесные ионизационно-рекомбинационные слои [3.11 -16].....</i>	<i>69</i>
<i>Результаты моделирования.</i>	<i>75</i>
<i>Инжекция в слабо проводящую жидкость.....</i>	<i>83</i>
<i>Влияние скорости гибели ионов на структуру рекомбинационных слоев.</i>	<i>85</i>

Экспериментальные исследования объемного заряда в жидких диэлектриках.....	87
Исследование тонкой структуры неравновесных приэлектродных слоев.....	88
Исследование объемного заряда в слабо проводящих жидкостях капельным методом [3.11, 3.22, 3.23].....	89
Исследование заряда приэлектродных слоев при плоской геометрии электродов.....	91
Литература к главе 3.	93

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ (ЭГД) ТЕЧЕНИЙ.....96

Исследование ЭГД-течений при помощи нелинейного оптического эффекта.	98
Экспериментальная установка для исследования ЭГД-течений методом визуализирующих включений.....	101
Методы восстановления поля скоростей ЭГД-течений.....	102
PTV-метод.....	103
Программа EHD reader [4.13].....	104
Анализ структуры ЭГД-течений в ограниченном объеме в несимметричной системе электродов типа провод над плоскостью.	105
Основные свойства ЭГД-течений инжекционного типа [4.15 – 4.21].	106
Исследование структуры ЭГД-течений при помощи PIV-метода [4.24,4.25].	111
Зависимость структуры ЭГД-течений от степени неоднородности электрического поля [4.9].....	115
Влияние примесного состава жидкости на кинематику ЭГД-течений [4.18 – 4.21].	120
ЭГД-течения в растворах йода.....	121
ЭГД-течения в растворах бутилового спирта.	122
Влияние характера примесей на интенсивность ЭГД-течений в изооктане [4.23].	123
Влияние материала электродов на проводимость и скорость ЭГД-течений в изооктане [4.22, 4.23].	126
Особенности структуры ЭГД-течений при биполярной инжекции. [4.26 – 4.31].....	128
Исследование ЭГД-течений в симметричной системе электродов PIV-методом [4.30, 4.31].	137
Исследование ЭГД-течений, обусловленных эффектом Вина [4.32, 4.33].....	142
Литература к главе 4.	145

ГЛАВА 5. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ИНЖЕКЦИОННОГО ТИПА.....148

Уравнения электрогидродинамики и безразмерные параметры [5.1-5.3].	148
ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ ПРИ ИНЖЕКЦИИ В НЕПРОВОДЯЩУЮ ЖИДКОСТЬ. .151	
Анализ процесса установления течений в системе электродов провод над плоскостью [5.6, 5.7].	152
Анализ ампер-секундных характеристик при инжекции в непроводящую жидкость [5.10].	156
Анализ сил и энергии при движении элементов жидкости вдоль центральной струи ЭГД-течения.	157

<i>Влияние собственной проводимости жидкости на объемный заряд и структуру ЭГД-течений [5.12].</i>	159
<i>Развитие ЭГД-течений инжекционного типа в жидкости с проводимостью 10 пкСм/м.</i>	160
<i>Структура центральной струи ЭГД-течений в широком диапазоне напряжений.</i>	162
<i>Литература к главе 5.</i>	170

ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ.172

<i>Течения в каналах(трубах) под действием объемных сил.</i>	172
<i>Компьютерное моделирование ЭГД-течений в симметричной системе электродов [6.8-6.15].</i>	175
<i>Встречные ЭГД-течения в канале.</i>	178
<i>Анализ процесса установления сквозного ЭГД-течения при разных токах инжекции с положительного и отрицательного электродов [6.15].</i>	182
<i>Униполярная инжекция в непроводящую жидкость [6.8].</i>	187
<i>Моделирования сквозного ЭГД-течения при биполярной инжекции в непроводящую жидкость [6.11].</i>	189
<i>Структура центральной струи сквозного ЭГД-течения в слабопроводящей жидкости при различных напряжениях [6.15].</i>	192
<i>Влияние величины низковольтной проводимости на структуру сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале.</i>	201
<i>Сравнение результатов экспериментального исследования и компьютерного моделирования [6.9, 6.10].</i>	206
<i>Литература к главе 6</i>	209

ГЛАВА 7. ЭГД-ТЕЧЕНИЯ ОБУСЛОВЛЕННОЕ ДИССОЦИАЦИЕЙ В ЗАКРЫТЫХ ОБЪЕМАХ.....211

<i>Сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментом.</i>	226
<i>ЭГД-течения от отверстия в диэлектрическом барьере (сравнение моделирования и эксперимента[7.14]).</i>	227
<i>Литература к главе 7.</i>	229

ГЛАВА 8. ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА.231

<i>ЭГД-преобразователи электрохимического типа [8.3].</i>	234
<i>Циклический ЭГД-преобразователь</i>	236
<i>Компьютерное моделирование ЭГД-преобразователей инжекционного типа с симметричной системой электродов [8.10]</i>	239
<i>Симметричная система электродов провод-провод.</i>	240
<i>Фокусирующая система электродов</i>	242
<i>ЭГД-насосы с асимметричным сильно неоднородным электрическим полем [8.11].</i>	244
<i>Компьютерное моделирование ЭГД-насоса с сильно неоднородным полем [8.14].</i>	248
<i>Лабораторная установка для электрораспыления диэлектрических жидкостей.</i>	253
<i>Литература к главе 8</i>	255

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.257

*Монография посвящается моему учителю
профессору Г.А. Остроумову*

Введение.

Монография содержит результаты более чем пятидесятилетних оригинальных исследований в области электрофизики жидких диэлектриков, выполненных автором работы совместно с учениками. Автор систематически участвует в работе различных международных конференций, является сопредседателем Международной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей» систематически проводимой на базе НОЦ электрофизика СПбГУ в течении 28 лет. Автор хорошо знаком с работами российских и иностранных ученых в этой области и с уважением относится к ним. Однако в книге использованы преимущественно оригинальные исследования, полученные в лаборатории электрофизики СПбГУ.

Результаты отдельных исследований опубликованы в учебных пособиях, квалификационных работах студентов и аспирантов, в статьях включенных в сборники докладов международных конференций, а также в многочисленных статьях, опубликованных в периодических журналах. В монографии приводятся ссылки на основные опубликованные работы. Ранее учеными СПбГУ по этой тематике изданы две монографии: Остроумов Г.А. «Взаимодействие электрических и гидродинамических полей», и Ю. К. Стишков, А. А. Остапенко. "Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках". Автор использовал некоторые результаты исследований, приведенных в этих источниках, однако существенно дополнил их результатами современных исследований.

Книга состоит из введения, восьми глав и заключения. В первой главе приводятся известные сведения о структуре жидкостей, особенностях межмолекулярного взаимодействия в них, а также особенностях структуры основных жидких диэлектриков. Вторая глава посвящена анализу механизмов проводимости жидких диэлектриков. Анализ ведется на основе оригинальных экспериментальных исследований, выполненных в лаборатории электрофизики СПбГУ. Описаны особенности низковольтной и высоковольтной проводимости на основе исследования вольтамперных характеристик большой группы жидкостей в стандартной измерительной ячейке. Установлено, что проводимость жидких ди-

электриков носит примесный характер. Предложены и исследованы примеси, существенно изменяющие электрофизические свойства жидких диэлектриков. Исследовано влияние материала электродов на характер ВАХ в различных условиях. Установлен диапазон условий, в которых основным механизмом высоковольтного участка ВАХ является инжекция. Исследованы ВАХ и ДВАХ в зависимости от концентрации примесей в несимметричных и симметричных электродных системах. Разработан метод исследования ДВАХ, обусловленных эффектом Вина. Оригинальная экспериментальная установка для изучения ДВАХ позволила получить и проанализировать высоковольтные участки ДВАХ диссоционного типа, обусловленные эффектом Вина.

Третья глава посвящена механизмам образования объемного заряда в жидких диэлектриках. Поскольку носителями заряда в жидких диэлектриках являются ионы, здесь последовательно рассмотрены все возможные механизмы появления объемного заряда: электролитический, на примере электродов первого рода, ионообменный на границе раздела фаз, приводящий к образованию двойных слоев. Подробно рассмотрен электрокондуктивный механизм, обусловленный неоднородным распределением проводимости. Теоретически и путем численного моделирования исследован неравновесный диссоционно-рекомбинационный механизм, приводящий к нарушению электронейтральности в условиях отсутствия и наличия инжекции. Приведены оригинальные эксперименты, позволившие обнаружить и исследовать рекомбинационные слои в жидких диэлектриках.

В четвертой главе приводятся и анализируются результаты многочисленных экспериментальных данных, позволяющих разносторонне изучить свойства электрогидродинамических течений. Эти данные получены с использованием оригинальной методики, разработанной автором и его учениками. Методика основана на визуализации ЭГД-течений при помощи микронных воздушных пузырей, вводимых в межэлектродный промежуток при помощи специального капилляра. Данные исследований обработаны оригинальной программой. Полученные результаты оригинальны и уникальны. В главе приведены и проанализированы структурные особенности ЭГД-течений от напряжения во всем диапазоне существования ЭГД-течений, результаты исследования ЭГД-течений в электрических полях различной степени неоднородности, структура ЭГД-течений в очищенных жидкостях и в жидкостях с примесными добавками различной природы и концентрации, а также с электродами, выполненными из различных материалов. В главе приведены также и результаты современных исследований, выполненных при помощи PIV-метода, на установке La Vigen. Анализ результатов показал, что основная группа исследованных ЭГД-течений является течениями, обусловленными инжекцией. Для исследования ЭГД-течений обусловленных эффектом Вина предложена оригинальная методика, позволившая выявить и исследовать эти течения. Приведены результаты анализа этих течений и сравнения их структуры с течениями инжекционного типа. Приведены и проанализированы оригинальные результаты исследования ЭГД-течений в симметричных электродных системах типа системы провод-провод. Впервые обнаружено и детально исследовано т.н. сквозное ЭГД-течение, а также встречные ЭГД-течения. Анализ структуры этих течений позволил установить, что они являются течениями инжекционного типа. Приводятся, также, результаты исследования этих течений PTV-методом на установке La Vigen в широком диапазоне напряжений и низковольтных проводимостей.

В пятой главе приведены результаты моделирования ЭГД-течений при помощи программного комплекса COMSOL. В начале главы приведены результаты анализа структур-

ных особенностей т.н. силовых течений, в которых течение возникает и поддерживается под действием объемных сил. Это исследование позволило по характеру профиля скорости течений идентифицировать силовую область течения. Разработана оригинальная методика моделирования ЭГД-течений в COMSOL, при помощи которой проведены систематические исследования структуры ЭГД-течений в различных условиях. Данные моделирования изложены в многочисленных публикациях и на момент публикации они являлись приоритетными. При помощи этой методики проведены и представлены систематические исследования структурных особенностей ЭГД-течений в трех ионной и двух ионной постановках, позволившие провести совместный анализ зарядовой и кинематической структуры ЭГД-течений в различных условиях. Проведен анализ этапов процесса установления ЭГД-течения, а также анализ зонной структуры центральной струи ЭГД-течения в различных условиях в условиях слабой и сильной инжекции. Разработана и изложена методика расчета токовых характеристик процесса. Проведено сопоставление этапов развития ЭГД-течения с характером амперсекундных характеристик. Приводятся результаты анализа силовой структуры ЭГД-течения и сопоставления с зонной структурой скорости. Описан оригинальный метод исследования ЭГД-течений в широком диапазоне напряжений, аналогичный методу ДВАХ, позволяющий проследить этапы развития структуры ЭГД-течений в замкнутых объемах в диапазоне их существования по шкале напряжений. Приведены расчетные динамические ДВАХ, которые сопоставлены с распределениями скоростей и зарядов при различных напряжениях. Проанализирована роль конвективного тока и его влияние на характер высоковольтного участка ДВАХ.

В шестой главе приведены результаты компьютерного моделирования ЭГД-течений в каналах в симметричных системах электродов типа провод-провод. Проанализированы основные особенности течений силового типа и его отличия от течений обусловленных перепадом давлений. Показано, что режим встречных течений возникает при одинаковых токах инжекции на обоих электродах, а режим сквозного течения при различных начальных уровнях инжекции на положительном и отрицательном электродах. Приведен анализ процесса установления ЭГД-течений в четырех ионной модели, детализированы этапы установления сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале при инжекции с обоих электродов. Исследовано течения при униполярной инжекции только с одного электрода, показано формирование зарядовой пробки, приводящей к возникновению внутренних вихрей. Показано, что в режиме биполярной инжекции формируется слоистая структура в заэлектродной области, препятствующая развитию внутренних вихрей. Приводится детальный анализ структуры установившегося сквозного ЭГД-течения при двух уровнях низковольтной проводимости. Выявлены характерные различия силового течения в межэлектродном промежутке и вязко-диссипативного в замкнутом канале. Исследованы структурные особенности сквозного ЭГД-течения в широком диапазоне напряжений. Выявлены этапы формирования приэлектродных диссоционно-рекомбинационных слоев и инжекционных струй в режиме медленного подъема (спада) напряжения. Приведены интегральные характеристики сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале: зависимости расход и тока от напряжения. Приведено сопоставление интегральных характеристик сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале с характеристиками ЭГД-течения в ограниченном объеме.

В седьмой главе приводятся результаты компьютерного моделирования ЭГД-течений диссоционного типа, обусловленных эффектом Вина. Эти течения обусловлены процессами объемного характера в отличие от течений инжекционного типа и возникают в

жидкостях повышенной проводимости. Поэтому их можно реализовать вдали от электродов в объеме жидкости. При помощи компьютерного моделирования исследованы свойства ЭГД-течений диссоционного типа в различных условиях: у поверхности электродов лезвиеобразного и трубчатого типа и у поверхности твердых диэлектрических барьеров. Показано, что у поверхности твердого диэлектрика формируется диффузионный слой объемного заряда, снижающий нормальную к поверхности диэлектрика компоненту электрического поля. Течения диссоционного типа развиваются из области повышенной проводимости, усиленной электрическим полем. В случае, когда эта область контактирует с поверхностью электродов, течения направлены от электрода в жидкость, когда область повышенной проводимости контактирует с поверхностью диэлектрика, течения направлены вдоль поверхности твердого диэлектрика. На примере барьера из твердого диэлектрика с малым отверстием исследовано ЭГД-течение диссоционного типа, показано, что в отверстии возникает область повышенной диссоциации усиленной полем, приводящая к возникновению оригинальных ЭГД-течений, направленных на отверстие. На примере барьера из твердого диэлектрического материала показано формирование приэлектродных слоев диффузного и неравновесного диссоционно-рекомбинационного типа, приводящих к ЭГД-течениям двух различных типов, в зависимости от величины низковольтной проводимости жидкости.

В восьмой главе рассмотрены оригинальные ЭГД-устройства, разработанные автором, совместно с его учениками. Описана конструкция ЭГД-насоса с электродами типа лезвие-пластины. Далее рассмотрен оригинальный тип ЭГД-насосов: ЭГД-преобразователи электрохимического типа с электродами типа провод-провод, в которых использовано т.н. сквозное ЭГД-течение. На базе компьютерных моделей классифицированы ЭГД-системы с т.н. расфокусирующими и фокусирующими системами электродов. Приведена конструкция ЭГД-преобразователя электрохимического типа, работающего в режиме преобразователя расхода в кольцевом канале. Приведена компьютерная модель преобразователя давления с электродной системой игла-конфузор. Компьютерная модель показала высокую эффективность работы такого преобразователя при определенных геометрических параметрах игольчатого электрода. Приводится также оригинальная лабораторная установка ЭГД-фонтана, работающего на основе ЭГД-преобразователя давления, позволяющего демонстрировать и исследовать в лабораторных условиях влияние объемного заряда жидкости на процесс распыления.

Автор выражает благодарность своим многочисленным ученикам и сотрудникам за совместную работу по отдельным вопросам, освещенным в монографии и помощь в оформлении текста и иллюстративного материала.

В монографии использованы результаты, полученные с использованием оборудования ресурсных центров СПбГУ: "Вычислительный центр СПбГУ", а также «Геомодель».

ГЛАВА 1. СТРОЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Жидкость – одно из агрегатных состояний вещества, характеризующееся способностью неограниченно менять форму под действием механических напряжений и при этом практически сохранять свой объём. Она занимает промежуточное положение между кристаллическим твердым телом [1.1]. Мы очень часто встречаемся с веществами, находящимися в жидком агрегатном состоянии. Прежде всего, к ним относится вода, необычная по ряду своих свойств жидкость, и так необходимая в повседневной жизни. Другими примерами являются кислоты, спирты, продукты переработки нефти и т.п., жидкие металлы и т.п. Характерные свойства жидкости определяются особенностями межмолекулярного взаимодействия в ней. В жидкости молекулы расположены очень плотно, и расстояния между ними оказываются того же порядка величины, что и размеры молекул, и поэтому их движение уже нельзя считать полностью неупорядоченным, как в случае газового состояния. Вместе с тем, они не достигают и той упорядоченности в расположении молекул, которая характерна для кристаллических твердых тел. Так, для последних характерно расположение атомов, молекул или ионов в узлах кристаллической решетки. Подобная периодичность носит название дальнего порядка. Экспериментальные исследования жидкого состояния вещества, основанные на наблюдении дифракции рентгеновских лучей и потоков нейтронов при прохождении их через жидкие среды, обнаружили наличие в жидкости ближнего порядка, т.е. наличие некоторой упорядоченности в расположении частиц лишь на малом расстоянии от какой-либо выделенной позиции.

Межмолекулярные силы [1.2].

Эти силы обладают рядом интересных особенностей. При растяжении, т.е. удалении молекул друг от друга, межмолекулярное взаимодействие проявляется в виде сил *притяжения*, а при сжатии, т.е. при сближении молекул на расстояния порядка линейных размеров самих молекул – в виде сил *отталкивания*. Следовательно, существует определенное расстояние d между молекулами, когда силы отталкивания и притяжения уравновешены и их равнодействующая равна нулю. Система молекул, расположенных на расстояниях d друг от друга, находится в состоянии устойчивого равновесия, а энергия взаимодействия между ними – минимальна.

Молекулярные силы являются близкодействующими и проявляются только в том случае, когда расстояния между молекулами имеют порядок эффективных размеров самих молекул. Именно этим объясняется тот факт, что при анализе явлений в газах, где расстояния между молекулами примерно в 10 раз больше, чем в жидкостях или твердых телах, можно в большинстве случаев пренебречь действием молекулярных сил. Известно, что плотность или упругие свойства жидкостей и твердых тел не зависят от размеров исследуемого образца: капля воды и вода в океане при одинаковой температуре и одинаковом внешнем давлении имеют совершенно одинаковую плотность и сжимаемость. Следова-

тельно, величина молекулярных сил не зависит от общего числа молекул, и этим они принципиально отличаются от гравитационных или кулоновских сил, где равнодействующая определяется действием всех тел, входящих в систему.

Общее уравнение межмолекулярного взаимодействия при постоянной температуре (уравнение Леннарда - Джонса) записывается в следующем виде:

$$U_{\text{ЛД}} = 4\varepsilon \cdot [(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6] \quad (1.1)$$

где ε – глубина потенциальной ямы, σ – расстояние, на котором энергия взаимодействия становится равной нулю. Выражение (1.1) носит название "потенциала 6-12", поскольку энергия притяжения пропорциональна $1/r^6$, а энергия отталкивания $-1/r^{12}$. Кривая безразмерного потенциала $U(r)$ имеет вид, изображенный на рис.1.1. Минимум потенциала находится в точке $d = 2^{1/6}\sigma \approx 1,12\sigma$. Соответствующая сила, действующая между молекулами, пропорциональна градиенту потенциальной энергии, взятому с обратным знаком, и записывается в следующем виде:

$$F = \frac{4\varepsilon}{\sigma} \cdot [12(\sigma/r)^{13} - 6(\sigma/r)^7] \quad (1.2)$$

Расстояние, при котором силы отталкивания уравновешивают силы притяжения, соответствует минимуму потенциальной энергии d . При $r < d$ равнодействующая сила положительна, т.е. сила отталкивания превосходит притяжение; а при $r > d$ наоборот – притяжение оказывается сильнее отталкивания и равнодействующая сила становится отрицательной. Максимальное значение силы притяжения F_{max} достигается на расстоянии $r_{\text{max}} \approx 1,25\sigma \approx 1,11d$.

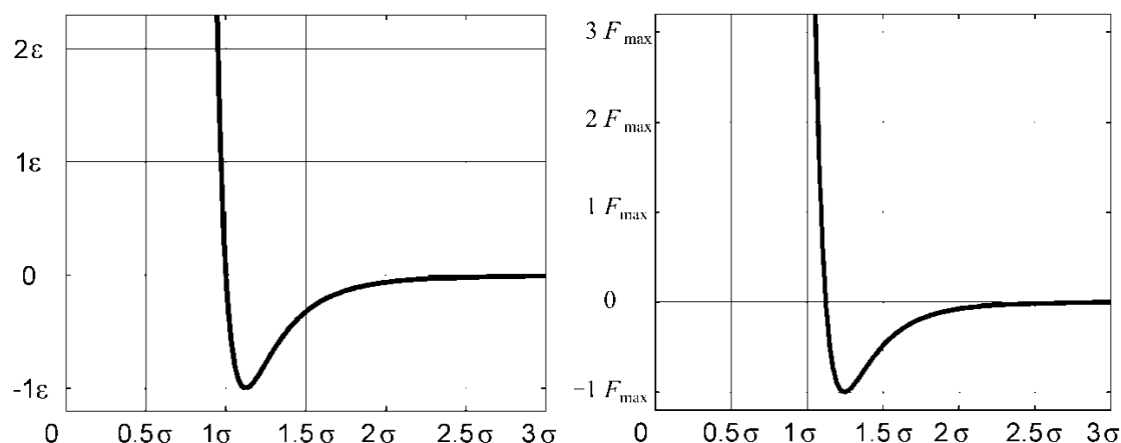


Рис.1.1. Зависимость относительного потенциала U (слева) и силы F (справа) межмолекулярного взаимодействия от относительного расстояния r между молекулами.

При увеличении расстояния между молекулами сила притяжения убывает, и уже на расстоянии $2d$ её значение становится практически в 30 раз меньше максимального. А при сближении молекул всего на 10% от равновесного положения, то сила отталкивания уже в 8 раз превышает максимальное значение сил притяжения, а при расстоянии $0,75d$ – практически в 300 раз. Такая сильная зависимость силы от расстояния означает, что молекулярные силы являются короткодействующими – молекулы взаимодействуют только со своими ближайшими соседями [4]. Если изобразить молекулы в виде плотно упакованных шариков (рис.1.2, [4]), что, в общем, соответствует упаковке молекул во многих жидко-

стях и твердых телах, то зачерненная молекула взаимодействует только с первым окружающим ее слоем. С погрешностью, не превосходящей 3%, можно пренебречь взаимодействием молекулы со вторым, а тем более с третьим и далее лежащими слоями.

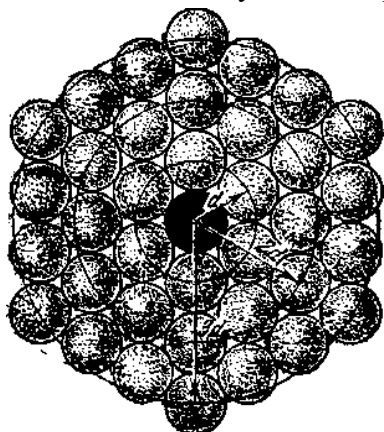


Рис.1.2. Схематическое изображение расположения молекул в жидкости в виде плотно упакованных шариков.

Механизм внутреннего трения в жидкостях, также, как и в газах заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей. Однако, в отличие от газов, с повышением температуры вязкость жидкости не увеличивается, а уменьшается, поскольку происходит усиление теплового движения и, связи между молекулами ослабевают. Напомним, что увеличение вязкости газа с температурой происходит за счёт того, что торможение движущихся в нем объектов осуществляется за счет ударного механизма, т.е. пропорционально кинетической энергии поступательного движения молекул газа.

При изучении электрофизических процессов в жидкостях наиболее важными параметрами исследования являются **электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость** жидкости. В отличие от газов, уровень электрической проводимости которых в области низких напряжений ничтожен и определяется космическим излучением, в жидкостях ситуация иная. Диапазон электрической проводимости жидкостей огромен – от $10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для жидких металлов до $10^{-19} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для очень чистых жидких диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость жидкостей изменяется не столь существенно – в диапазоне от 1,6 для неполярных жидких диэлектриков до 81 у воды. К классу жидких металлов при комнатной температуре относится, например, жидкая ртуть, а к классу жидких диэлектриков – парафиновое масло. Электрическая проводимость жидкостей в области низких напряжений обуславливается процессами электролитической диссоциации, изучение которых было начато в теории электролитов [1.3]. Электролиты – это вещества, обладающие способностью при растворении в соответствующих растворителях распадаться на ионы. Распад электролитов на ионы при растворении был назван процессом электролитической диссоциации, а соответствующая теория Аррениуса – теорией электролитической диссоциации. Наиболее распространёнными являются водные электролиты. Расщепление молекул на элементарные частицы, например, молекул поваренной соли, происходит и без всякого действия электрического поля. В воде благодаря находящимся в ней дипольным молекулам действуют электрические силы, под действием которых молекулы соли распадаются на ионы. Число ионов, образовавшихся в результате диссоциации одной молекулы электролита, так же, как величина и знак заряда этих ионов, зависят от его природы. Некоторые электролиты при растворении распадаются на ионы не полностью, и только определенная часть растворенных молекул присутствует в виде ионов. Доля молекул, распавшихся в состоянии равновесия на ионы, отвечает степени электролитической диссоциации и обозначается через α . Степень электролитической диссоциации равна отношению числа молекул n , распавшихся на ионы, к общему числу растворенных молекул N (ионизированных n и неионизированных n_a ионов):

$$\alpha = n / N = n / (n + n_a) \quad (1.3)$$

Степень электролитической диссоциации вещества, растворенного в данном растворителе, зависит (при постоянной температуре) от природы этого вещества и от его концентрации. Если вещество не диссоциирует при растворении, то оно не является электролитом. Если α близка к единице, то $n \sim N$ и соединение является сильным электролитом, а если $\alpha \ll 1$ – то слабым. В такой классификации неполярные и слабополярные жидкие диэлектрики относятся к классу очень слабых электролитов. В отличие от водных электролитов в этих жидкостях молекулы примесей диссоциируют далеко не полностью и поэтому электрическая проводимость их существенно ниже, чем у водных электролитов.

К диэлектрикам традиционно относят вещества, имеющие очень малую электрическую проводимость, т.е. малое количество свободных носителей электрического заряда, в основном ионов, способных свободно перемещаться в электрическом поле. Электрическая проводимость σ измеряется путем измерения тока I в ячейке с плоскими электродами площадью S и расстоянием между ними d . При приложении к электродам в жидкости напряжения U , проводимость жидкости можно определить из формулы:

$$\sigma = \frac{I \cdot d}{U \cdot S} \quad (1.4)$$

Величину проводимости для жидких диэлектриков обычно измеряют в $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ или в См/м . Измерения, как правило, проводятся в диапазоне относительно низких напряжений – до 100 вольт. Некоторые жидкие диэлектрики путем очень тщательной очистки можно довести до значений проводимости в $10^{-18} - 10^{-19} \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Типовые значения проводимости этих жидкостей в состоянии технической чистоты (ч.д.а. – чистая для анализов) обычно на 7–8 порядков выше и составляют $10^{-10} - 10^{-12} \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Величина в $10^{-8} \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ обычно принимается за нижнюю границу проводимости жидких диэлектриков, однако к диэлектрикам относят иногда и деионизованную, дистиллированную воду, проводимость которой не может быть снижена менее чем до $10^{-8} \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Основное условие, характеризующее поведение вещества, основано на понятии **Максвелловского времени диэлектрической релаксации**: $\tau = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \sigma$. Время максвелловской релаксации характеризует время релаксации объемного заряда.

Молекулярная структура некоторых жидких диэлектриков[1.4]

Наилучшими жидкими диэлектриками считаются сжиженные газы, соединения типа насыщенных и ароматических углеводородов, ненасыщенные парафиновые и вазелиновые масла и другие преимущественно органические жидкости. Рассмотрим более подробно структуру и свойства некоторых жидких диэлектриков.

Насыщенные углеводороды.

Наиболее распространенными диэлектрическими жидкостями являются насыщенные углеводороды (или парафины) типа $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$:

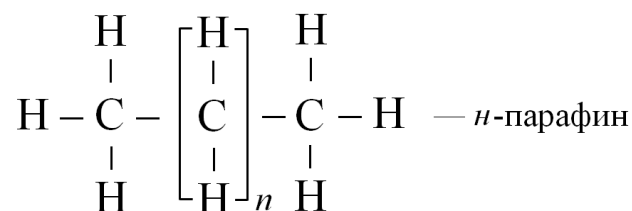


Рис.1.3. Схематическое изображение молекулы насыщенного углеводорода.

К ним, в частности, относятся:

- CH_4 – метан;
- $\text{CH}_3 \text{CH}_3$ –этан;
- $\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{CH}_3$ – пропан;
- $\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{CH}_3$ – бутан;
- $\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{CH}_3$ – пентан;
- $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_4 \text{CH}_3$ – гексан;
- $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_5 \text{CH}_3$ – гептан;
- $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_6 \text{CH}_3$ – октан;
- $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_7 \text{CH}_3$ – нонан;
- $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_8 \text{CH}_3$ – декан.

Они максимально насыщены атомами водорода и поэтому проявляют наименьшую по сравнению с другими видами углеводородов химическую активность. Это и определило их название – парафины, т.е. неактивные.

Молекулы насыщенных углеводородов типа $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ имеют форму длинных зигзагообразных цепочек (рис.1.6). Сечение молекул почти одинаково у всего ряда, а длина h увеличивается пропорционально числу групп CH_2 :

$$h = h_0 + a \cdot (n-1) \quad (1.5)$$

где $h_0=4\text{\AA}$, $a=1,22\text{\AA}$. На концах цепочки имеются по одной группе CH_3 . В твердом состоянии, цепочка лежит в одной плоскости, в жидком или газообразном состоянии, цепочка вращается, и молекула имеет вид цилиндра.

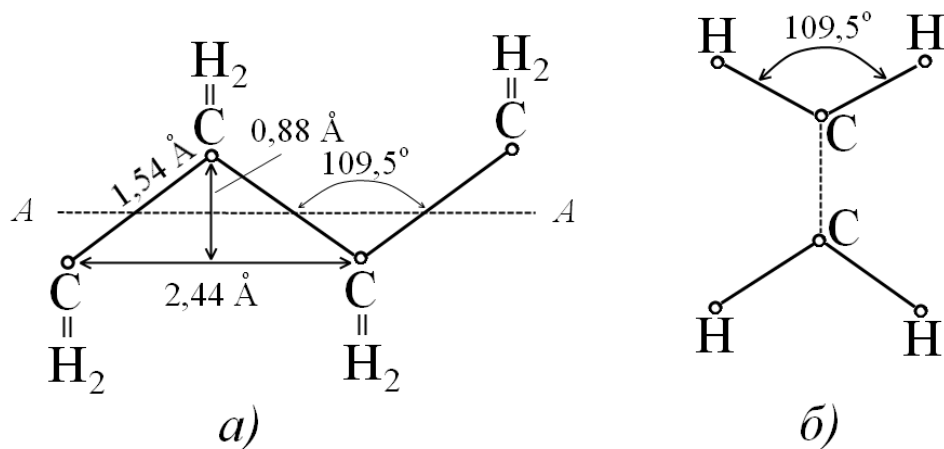


Рис.1.4. Схема размещения атомов углерода С и водорода Н в молекуле насыщенного (нормального) углеводорода в средней части цепочки: а) AA– ось молекулы; б) расстановка групп CH_2 .

Отдельные группы CH_2 вращаются относительно своих связей, а группы $\text{C}-\text{C}-$ относительно оси молекулы. Это вращение происходит без изменения основных параметров молекулы, расстояния между атомами углерода ($1,54\text{\AA}$). Поэтому такие молекулы можно представить в виде цилиндров с одинаковым основанием и высотой пропорциональной числу атомов углерода в молекуле (рис.1.5).

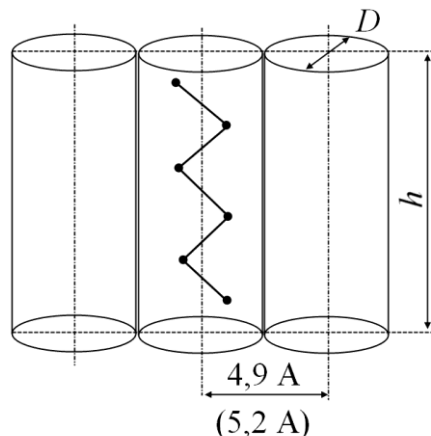


Рис.1.5. Пространственное размещение молекул в насыщенных нормальных углеводородах (на примере молекулы гексана C_6H_{14}); D – диаметр основания трубки, занимаемой одной молекулой, h – высота трубки.

Углеводородные масла. Многочисленные исследования по пробою и исследованию ЭГД-течений проведены в вязких жидкостях – углеводородных маслах и кремнийорганических жидкостях (силиконах). Углеводородные масла получают из нефти. Масло обычно представляет собой смесь различных углеводородов. Наиболее часто встречаются ароматические, парафиновые, наftenовые и олефиновые. Процентный состав масла зависит от месторождения. В нефти некоторых месторождений преобладают парафиновые углеводороды – до 80-ти процентов.

Плотность масел лежит в пределах $870\text{--}960\text{кг/м}^3$, молекулярный вес – $230\text{--}290\text{г/моль}$, вязкость – от 0,01 до нескольких пуаз, удельная проводимость $10^{-12}\text{--}10^{-16}\text{Сим/м}$, относительная диэлектрическая проницаемость 2,0–2,3. Электрическая прочность зависит от чистоты масла и частоты напряжения. Считается, что для хорошо очищенных масел она может достигать очень больших величин – порядка $400\text{--}500\text{кВ/см}$, а для масел технической очистки она на порядок ниже.

Углеводородные масла широко применяются в технике в качестве изоляции в конденсаторах, трансформаторах, кабелях и т.д. Наиболее распространенный в энергетике жидкий диэлектрик – это *трансформаторное масло* [1.5]. **Трансформаторное масло**– это очищенная фракция нефти, получаемая при перегонке, кипящая при температуре от 300°C до 400°C . В зависимости от происхождения нефти обладают различными свойствами, и эти отличительные свойства исходного сырья отражаются на свойствах масла. Оно имеет сложный углеводородный состав со средним молекулярным весом $220\text{--}340\text{ г/моль}$, и содержит следующие основные компоненты:

1. Парафины	10–15%
2. Наftenы или циклопарафины	60–70%
3. Ароматические углеводороды	15–20%
4. Асфальто-смолистые вещества	1–2%
5. Сернистые соединения	<1%
6. Азотистые соединения	<0,8%
7. Наftenовые кислоты	<0,02%
8. Антиокислительная присадка (ионол)	0,2–0,5%

Конденсаторные масла. Под этим термином объединена группа различных диэлектриков, применяемая для пропитки бумажно-масляной и бумажно-пленочной изоляции конденсаторов. Наиболее распространенное **конденсаторное масло** по ГОСТ 5775–68 производят из трансформаторного масла путем более глубокой очистки. Отличается от обычных масел большей прозрачностью, меньшим значением $\operatorname{tg}\delta$ (более чем в десять раз). **Касторовое масло** имеет растительное происхождение и получается из семян клещевины. Основная область использования – пропитка бумажных конденсаторов для работы в импульсных условиях. Плотность касторового масла 950–970 кг/м³, температура застывания от –10°C до –18°C. Его диэлектрическая проницаемость при 20°C составляет 4,0–4,5, а при 90°C $\epsilon=3,5\text{--}4,0$; $\operatorname{tg}\delta$ при 20°C равен 0,01–0,03, а при 100°C $\operatorname{tg}\delta=0,2\text{--}0,8$; $E_{\text{пр}}$ при 20°C равно 15–20 МВ/м. Касторовое масло не растворяется в бензине, но растворяется в этиловом спирте. В отличие от нефтяных масел касторовое не вызывает набухания обычной резины. Этот диэлектрик относится к слабополярным жидким диэлектрикам, а его удельное сопротивление при нормальных условиях составляет $10^8\text{--}10^{10}$ Ом·м, но при очистке может быть существенно снижено.

В настоящее время стали широко использоваться кремнийорганические жидкости-силиконы. Они также имеют цепочную структуру молекулы (рис.1.6). У силиконов большая плотность до 0,98, температура кипения лежит в пределах 100–250°C, температура замерзания (–44)–(–70)°C, вязкость – 1–10⁵ пуаз. Силиконы обладают всеми свойствами хороших диэлектриков – высокое пробивное напряжение, химическая нейтральность, слабая гигроскопичность и высокая теплостойкость.

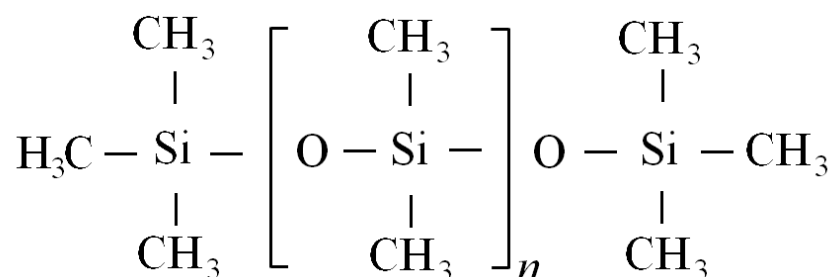


Рис.1.6. Схематическое изображение молекулы полидиметилсилоксана.

Возникшая после запрета хлордифенилов, проблема поиска подходящего пожаробезопасного жидкого диэлектрика до сих пор не решена. В каждой стране ее пытаются решать по-своему. В Великобритании пытаются внедрять диэлектрики на основе эфиров пентаэритрита (фирменное название Мидель 7221, Мидель 7131), в Германии – диэлектрики на основе эфиров фталевой кислоты (Bayelectrol, диоктилфталат). В России и некоторых других странах наиболее перспективными для применения считаются силиконы (силоксаны) или кремнийорганические жидкости. Это громадный класс жидкостей с различными электро- и теплофизическими характеристиками. Хорошо очищенные жидкости обладают $\epsilon=2,5\text{--}3,5$, $\operatorname{tg}\delta<10\text{--}3, \rho>10^{12}$ Ом·м. Обычно у этих соединений повышенная, по сравнению с маслом, температура вспышки. Некоторые жидкости, на основе модифицированных полиметил- и полиэтилсилоксанов имеют температуру вспышки около 300°C.

К недостаткам силоксанов относится то, что исследованные кремнийорганические жидкости не могут обеспечить пожаробезопасность и, следовательно, не могут полностью

заменить хлордифенилы. Кроме того, они в несколько раз дороже трансформаторного масла.

Очень интересен класс *фторорганических жидкостей*. В зарубежной литературе они называются перфторуглероды. По сути, это эквивалент органическим жидкостям, только вместо атома водорода везде находится атом фтора. Например, есть аналоги органическим соединениям, таким как пентан C_5H_{12} – перфторпентан C_5F_{12} , гексан C_6H_{14} – перфторгексан C_6F_{14} .

Существует даже перфтортрансформаторное масло. В отличие от настоящего трансформаторного масла перфтортрансформаторное масло при нормальных условиях является пластичным веществом и используется в качестве морозостойкой смазки. Наличие фтора на месте водорода означает, что вещество полностью окислилось, ведь фтор является самым сильным окислителем, более сильным, чем кислород. Поэтому фторуглеродные жидкости инертны по отношению к любым воздействиям, в т.ч. стабильны под действием электрического поля и температуры. Поскольку они ни с чем не взаимодействуют, они не растворяют масла, резину, воду и т.п. Высокие характеристики фторуглеродных жидкостей важны для применений. Замена атома Н на атом F приводит к новым свойствам и новым возможностям:

- негорючесть;
- высокая термическая и химическая стабильность;
- инертность по отношению к металлам, твердым диэлектрикам и резинам;
- нетоксичность, отсутствие цвета и запаха;
- возможность подбора жидкостей с различными точками кипения и замерзания;
- низкая растворимость воды и высокая растворимость газов;
- отсутствие растворимости любых не фторированных материалов;
- высокий коэффициент температурного расширения.

Проведенные исследования поведения некоторых жидкостей при постоянном и переменном напряжении показывают, что по электрофизическим параметрам: удельное сопротивление, $\tan\delta$, электрическая прочность, они значительно превосходят аналогичные показатели любых других жидкостей, включая минеральные масла. Они нетоксичны, не окисляемы, имеют низкую вязкость, в т.ч. в низкотемпературной области. Ряд жидкостей имеют точку замерзания -70°C и ниже. Основное препятствие к более широкому использованию – сравнительно высокая цена. Это препятствие может быть устранено. В настоящее время имеется задел по разработке новой, более дешевой технологии получения перфторуглеродов.

Приведем численные значения некоторых электрофизических параметров. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon=1,8-2$, $\tan\delta<10^{-4}$, $\rho>10^{12}-10^{15}\text{Ом}\cdot\text{м}$, электрическая прочность – до 500кВ/см . Важной особенностью является достаточно высокая электрическая прочность в газообразном (парообразном) состоянии – до $200-300\text{кВ/см}$, т.к. фторуглеродные молекулы имеют высокое сродство к электрону, т.е. они являются электроотрицательными веществами. Хотя теплопроводность фторуглеродов в два-три раза ниже, чем у трансформаторного масла, однако исключительно высокий коэффициент температурного расширения приводит к возникновению мощных конвективных потоков. При этом конвективный теплоотвод оказывается в 3–4 раза выше, чем у трансформаторного масла. Глав-

ный недостаток – дороговизна. Они дороже трансформаторного масла в несколько десятков раз.

К настоящему времени в энергетике эти жидкости не нашли широкого применения. За рубежом применяются для охлаждения мощных выпрямителей и инверторов, преобразующих переменный ток в постоянный ток, для СВЧ устройств. Предполагаемое создание компактных пожаробезопасных *испарительных трансформаторов* для электротранспорта и компактных ЗРУ возможно только на основе перфторуглеродных жидкостей.

В последнее время все более популярными становятся диэлектрические жидкости на основе растительных масел. Они имеют несколько довольно больших преимуществ, относительно минеральных масел, а именно: экологически безопасны, более пожаробезопасны, производятся из возобновляемого сырья.

Как сообщают американские издания, крупнейшие компании Cooper Power Systems и Cargill Industrial Oils заключили соглашения о производстве, и сбыте диэлектрических жидкостей Envirotemp® FR3™, на основе соевого масла, которые, как подтвердило управление по охране окружающей среды США, является нетоксичным, возобновляемым и хорошо разлагаемым микроорганизмами веществом. Envirotemp® FR3™ обладает хорошими огнестойкими характеристиками. Трансформаторы с такой изоляцией можно содержать, как и на открытом воздухе, так и в закрытых помещениях, не прибегая к применению дорогостоящих систем противопожарной защиты.

На наш взгляд перспективно применение в электроаппаратах не только диэлектрических жидкостей на основе соевого масла, но и на основе рапсового масла, масла жожоба, пальмового масла и других растительных масел. В настоящее время они уже поступают на рынок, но пока только в качестве биологического топлива.

Литература к главе 1.

- 1.1 Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей, пер. с англ., М.: издательство иностранной литературы, 1961. 929 с.
- 1.2 Бараш Ю. С. Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1988. 344 с.
- 1.3 Измайлов Н.А. Электрохимия растворов. Изд-во Харьковского гос. университета, 1959. 957 с.
- 1.4 Адамчевский, И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972. 296 с.
- 1.5 Брай И. В. Регенерация трансформаторных масел, М: Химия, 1972. 168 с.

ГЛАВА 2. МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Электрофизические свойства диэлектриков определяются молекулярным строением, взаимодействием и характером теплового движения составляющих их частиц: электронов, ионов, атомов, молекул.

Все вещества в газообразном состоянии являются диэлектриками. Расстояние между молекулами (атомами) газа достаточно велико по сравнению с их размерами, и взаимодействие молекул происходит лишь в редкие моменты столкновений. Тепловое движение в этом случае проявляется в виде хаотического поступательного движения молекул (атомов) газа, а также в виде вращательно-колебательного движения многоатомных молекул. Движение электронов в пределах каждого атома или молекулы определяется законами квантовой механики. Энергия ионизации молекул велика и составляет единицы и десятки электронвольт.

Законы теплового движения атомов и молекул в жидкостях особенно сложны. С одной стороны, расстояние между молекулами (атомами) жидкости почти такое же, как в твердом теле, поэтому поступательные перемещения ограничены и тепловое движение носит главным образом колебательный и вращательный характер. С другой стороны, в отличие от твердого тела при определенных условиях в жидкостях появляется возможность кооперативного перемещения одних групп молекул относительно других, что обуславливает ее текучесть. Среди жидкостей имеются и диэлектрики (электроизоляционные масла, простые органические жидкости), и полупроводники (расплавленные германий, кремний) и металлы (железо, алюминий, медь в расплавленном состоянии). За счет большой растворяющей способности воды, обычно электропроводность влажных диэлектрических сред оказывается достаточно велика, т.к. растворенные вещества зачастую содержат соли, которые сильно диссоциируют. Причиной электропроводности жидких диэлектриков является растворение в них различных примесей с их последующей диссоциацией на ионы.

Отсутствие формы жидкости, легкость очистки дают возможность существенного уменьшения концентрации примесей, а, следовательно, и низковольтной электропроводности, что невозможно сделать с твердыми диэлектриками. Примеси резко повышают удельную проводимость жидкостей. Наиболее часто встречающимися примесями являются растворенные газы, вода, электролитические загрязнения и мелкие твердые частицы. Для уменьшения удельной проводимости жидкие диэлектрики подвергают тщательной очистке.

При обычной промышленной очистке жидких диэлектриков их проводимость можно понизить до уровня $\approx 10^{-9} \div 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Более тщательная очистка, выполненная специальными методами, позволяет получить уровни проводимости порядка $10^{-15} \div 10^{-17} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

¹. Дополнительная очистка жидкого диэлектрика может быть произведена длительным пропусканием тока (электроочистка). Значение тока при этом, спустя некоторое время после подключения источника напряжения к электродам, уменьшается в сотни раз. Основной причиной уменьшения тока с течением времени является удаление примесных ионов и заряженных коллоидных частиц к электродам и их последующая нейтрализация. В результате происходит необратимое изменение удельного сопротивления диэлектрика по всей его толщине, и при замыкании электродов накоротко после отключения источника напряжения обратного броска тока не наблюдается.

В настоящее время существуют несколько новых технологий очистки жидкостей, например **электродиализ**, благодаря которому некоторые жидкости очищали до рекордно низкого значения проводимости, близкой к лучшим образцам твердых диэлектриков, типа янтарь, т.е. до проводимости менее $\sigma \sim 10^{-17} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Это соответствует концентрации носителей заряда при подвижности 10^{-8} порядка 100 частиц в см^3 , т.е. в сто раз больше чем в газах. Удельная проводимость жидких диэлектриков в технических устройствах с течением времени может существенно возрасти вследствие поглощения влаги, образования кислот, различных ионов, продуктов полимеризации и разложения масел под действием кислорода и частичных электрических разрядов в газовых включениях [2.1].

Связь между подвижностью ионов и вязкостью жидкости, установленная Р. Вальдемом и Стоксом, может быть проиллюстрирована на основе простых модельных представлений о движении ионов, как заряженных шариков в вязкой среде. Кулоновская сила, действующая на заряженный ион в установившемся режиме уравнивается силой вязкого трения иона об окружающую нейтральную жидкость. Считая силу трения по Стоксу можно записать: $eE = 6\pi\eta r v$, где r , e , v - радиус, заряд и скорость иона. Скорость движения иона в однородном поле E равна произведению подвижности иона b на напряженность поля E : $v = bE$. Подставляя v в исходное равенство, получаем **соотношение Вальдена Стокса** $\eta b = e/(6\pi r)$, т. е. произведение вязкости жидкости на подвижность иона оказывается величиной постоянной для данной жидкости.

Наряду с ионным механизмом проводимости в жидких диэлектриках существенную роль может играть катафоретический механизм [2.4, 2.8].

Коллоидные частицы абсорбируют свободные ионы из жидкости, вследствие чего и приобретают заряд. Такие частицы подобно ионам двигаются в направлении электрического поля, внося вклад в электрический ток. В связи с этим различают два типа электропроводности жидких диэлектриков – ионную и катафоретическую. Собственная ионная электропроводность, обусловленная диссоциацией молекул, наблюдается у жидкостей с ионным типом связей в молекулах. Степень диссоциации (отношение числа диссоциированных молекул к общему числу молекул в жидкости) возрастает с увеличением диэлектрической проницаемости жидкости. В неполярных или слабополярных жидких диэлектриках с невысокой диэлектрической проницаемостью (бензол, жидкие углеводороды, минеральные и растительные масла) ионная электропроводность определяется в основном примесями, так как диссоциация основных молекул маловероятна. Степень диссоциации молекул примесей зависит от их природы, концентрации и диэлектрической проницаемости жидкости.

Вольтамперные характеристики «жидких диэлектриков» (экспериментальные данные).

За время исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) диэлектрических жидкостей накоплена большая статистика экспериментальных данных [2.2–2.5], а также проведено теоретическое исследование процессов зарядообразования и электрической проводимости, частично объясняющих полученные экспериментальные результаты (например, [2.4, 2.5]). При кажущейся простоте экспериментального исследования снятие ВАХ диэлектрических жидкостей сопряжено с рядом сложностей, таких как длительность переходных процессов, сильные флуктуации тока, связанные с нестабильностью ЭГД-течений, и прочее. Роль примесей и загрязнений в электроизолирующих жидкостях часто обсуждается в электротехнической литературе в свете существенного понижения пробивного напряжения из-за повышения их удельной электропроводности. Опытным путём установлено, что по мере очистки жидкости определенного молекулярного состава от малого количества примесей путем фильтрации ее удельная электропроводность падает скачкообразно, а пробивная прочность возрастает. Роль примесей, невидимых глазом по причине их малых, например, наноразмеров, можно хотя бы отчасти понять, наблюдая за поведением более крупных, например, коллоидных частиц и даже отдельных хорошо видимых макроскопических объектов правильной формы.

Естественные примеси в диэлектрической жидкости имеют множество разнообразных форм. Визуальными наблюдениями поведения твердых естественных включений с большим увеличением, например, через бинокулярный микроскоп [2.4] можно установить, что лишь самые симметричные видимые частицы твердых примесей, например, сферы, взвешенные в изолирующей жидкости, не всегда испытывают действие кулоновских сил в электрическом поле [2.8]. Некоторые, по-видимому заряженные частицы совершают направленное движение от одного электрода к другому. Понятно, что такие движущиеся в поле частицы активно участвуют в переносе зарядов и могут осуществлять значительную долю эффективной проводимости жидкости. Однако, некоторые частицы, подпрыгнув от электрода, могут на долгое время зависать в межэлектродном пространстве практически без движения.

Традиционно измерения электрической проводимости жидких диэлектриков осуществляют в стандартной кювете с плоскими электродами при низких напряжениях. Уровень низковольтной проводимости измерялся в кювете с плоскими латунными электродами площадью 25 см^2 и межэлектродным расстоянием в $0,25 \text{ см}$ по методике ГОСТа. Кювета считалась чистой после тщательной двойной промывке в авиационном бензине и в пинене, с последующим высушиванием. Остаточные примеси в исследуемой кювете после такой очистки не изменяли ее электропроводности более чем на 10-20% даже для жидкостей с малой электропроводностью в $10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Наряду с традиционным измерением низковольтной проводимости исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) жидких диэлектриков проводилось в электродных системах различной геометрий: несимметричных-типа провод над плоскостью или игла(шар) над плоскостью, симметричных -типа провод-провод и сложной, типа игла-конфузор широким диапазоне напряжений. Известно, что при подаче прямоугольной ступеньки напряжения на исследуемую кювету ток некоторое время релаксирует, причем время релаксации для жидкостей с проводимостью в $10^{-12} \text{ ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ может оказаться весьма существенным и достигать десятков минут и даже часов. Поэтому при изучении установившейся ВАХ в каждой исследуемой точке необходимо ждать установления тока.

В связи с описанными особенностями автором был разработан метод динамических ВАХ. Вольтамперные характеристики записывались в автоматическом режиме при медленном линейном изменении напряжения на источнике с постоянной скоростью. Ток автоматически регистрировался как в режиме роста, так и в режиме спада напряжения. В некоторых- экспериментах исследования проводились при двух скоростях изменения напряжения: «медленной» и «быстрой». В случае быстрого изменения напряжения на ВАХ обычно наблюдался гистерезис [2.5], обусловленный переходными процессами. При этом зависимость тока от напряжения, полученная при росте напряжения, отличалась от зависимости полученной при спаде напряжения. В случае медленного изменения напряжения гистерезис обычно пропадал, и обе зависимости сливались. Динамический метод исследования ВАХ позволял записывать ВАХ в течении длительного времени и изучать воспроизводимость результатов, а также исследовать процессы в течении длительного времени.

Снятые динамические ВАХ были сопоставлены с ВАХ, полученными обычным способом, когда значения тока измерялись при фиксированных напряжениях, после завершения всех переходных процессов.

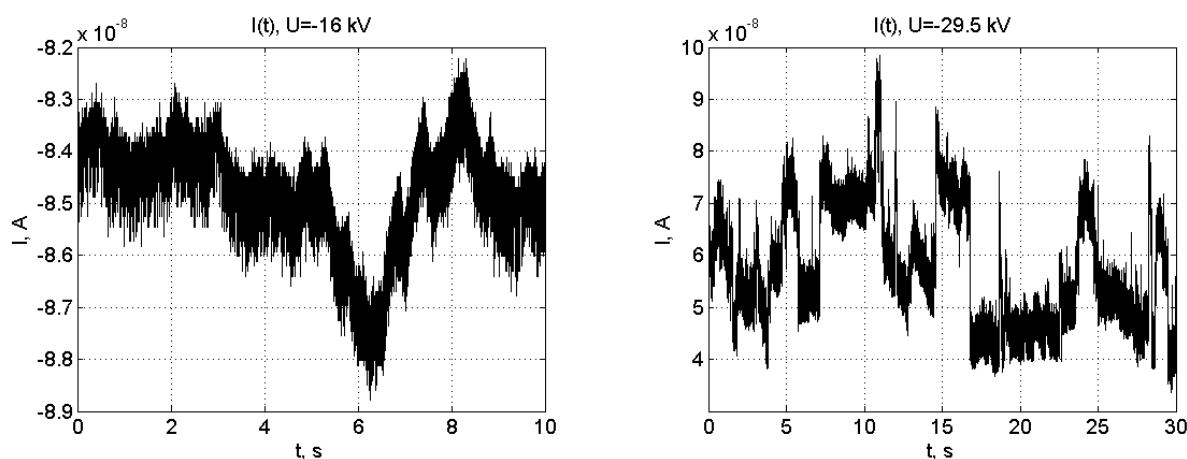


Рис. 2.1. Осциллограммы тока при фиксированном напряжении в трансформаторном масле (слева) и в вазелиновом масле (справа).

На рис.2.1 представлены осциллограммы тока в трансформаторном масле (проводимость $\sigma=1.7 \cdot 10^{-11} \text{ 1/(Ом} \cdot \text{м)}$) и в вазелиновом масле (проводимость $\sigma=1 \cdot 10^{-13} \text{ 1/(Ом} \cdot \text{м)}$). Характерные значения токов $-60-80 \text{ нА}$. На осциллограммах заметны флуктуации тока. Флуктуации особенно существенны в хорошо очищенной жидкости с малым уровнем низковольтной проводимости, т.е. в вазелиновом масле. Флуктуации имеют низкочастотную и высокочастотную составляющие. Диапазон низкочастотной составляющей лежит от долей герца до нескольких герц. Высокочастотная составляющая носит импульсный характер и лежит в диапазоне единиц Гц. При переходе к жидкостям менее высокой очистки степень флуктуаций тока снижается.

При снятии стационарных ВАХ флуктуации тока усредняются. При малых скоростях модуляции напряжения гистерезис вырождается и динамические ВАХ практически совпадают со стационарными, однако на динамических ВАХ флуктуации тока сохраняются.

Трансформаторное масло

VAC

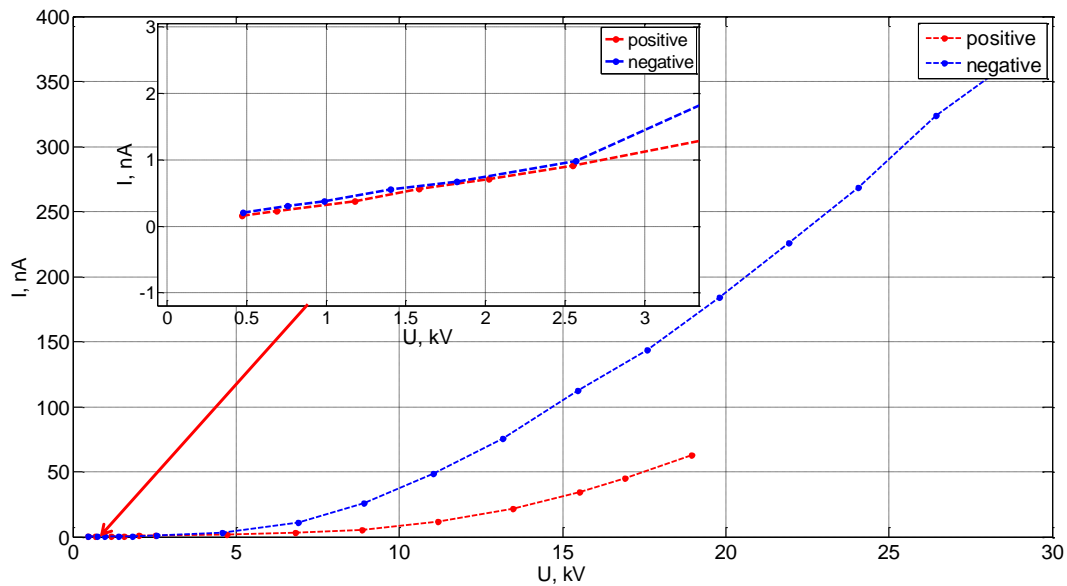


Рис. 2.2. Вольтамперная характеристика трансформаторного масла.

5/15

На рис.2.2 приведена типовая усредненная ВАХ снятая в трансформаторном масле для электродов стальная игла, расположенная нормально к латунному диску, межэлектродное расстояние 10 мм. ВАХ исследуемых жидкостей изучалась в широком диапазоне напряжений, охватывающем низковольтную область выполнения закона Ома (область до 2,5 кВ.) и высоковольтную область, в которой закон Ома нарушался. Переход из низковольтного участка в высоковольтный осуществляется плавно, без скачков тока. Напомним, что для газов подобный переход осуществляется скачком тока на несколько порядков. Обычно верхняя граница диапазона лежала на 5–10% ниже напряжения пробоя. Как видно диапазон изменения ВАХ достаточно широк, поэтому на рис.2.2 низковольтный участок в увеличенном масштабе представлен в верхней части рисунка. Далее на некоторых графиках, стационарные усредненные ВАХ приводятся в билогарифмическом масштабе. При этом оба участка уверенно просматриваются на графике, как в неоднородном, так и в однородном поле.

По линейному участку ВАХ можно определить низковольтную проводимость жидкости. В данном случае низковольтное сопротивление ячейки равно: $2,5 \cdot 10^{12} \text{ Ом}$. Для определения удельного сопротивления необходимо знать геометрический фактор системы игла-плоскость. Распределение напряженности поля в этой системе сильно неоднородно. Геометрический фактор наиболее просто определить для системы плоских электродов в котором поле однородно. В типовой ячейке с плоскими электродами (см. фото ячейки на рис. 2.3) исследовано более 20-ти различных слабопроводящих жидкостей различной степени очистки, среди которых хорошо очищенные трансформаторное, вазелиновое и касторовое масла, группа парафинов: гексан, ксилол, октан, изооктан, группа синтетических жидкостей: перфтордекалин и полиметилсилоксан. Среди исследованных жидкостей имеются хорошо очищенные и технические. Исследованы также некоторые смеси. В круг исследуемых жидкостей включен ряд технических и пищевых неочищенных масел, таких как подсолнечное масло, льняное масло для живописи, медицинское касторовое масло,

рыбий жир, неочищенное трансформаторное масло, а также фракция скипидара – пинен. Растительные масла представляют собой в основном смеси пальмитиновой, олеиновой, линолевой и стеариновой кислот в различных пропорциях, а пинен – выделенную перегонкой пиненовую фракцию скипидара.

Первая серия экспериментов проведена в кювете с плоскопараллельными электродами при межэлектродном расстоянии $l_0 = 0,25$ см в диапазоне 0–15 кВ., что в пересчете на среднюю напряженность поля составляло 0–60 кВ /см.

Следует отметить ряд особенностей, выявленных в процессе эксперимента:

а) при снятии вольтамперных характеристик в жидких диэлектриках без предварительной выдержки их под напряжением неоднократно отмечалась нестабильность показаний наноамперметра при включенном фиксированном напряжении;

б) пробой свежей порции жидкости отмечался при более низких значениях напряженности электрического поля, чем в жидкостях, предварительно выдержанных под допробойным напряжением;

в) после предварительной выдержки исследуемой жидкости под напряжением 10–12 кВ. в течение 15–20 минут показания наноамперметра стабилизируются, и наблюдаются флуктуации тока не более 20%. Усредненная ВАХ снятая после предварительной выдержки достаточно хорошо воспроизводится.

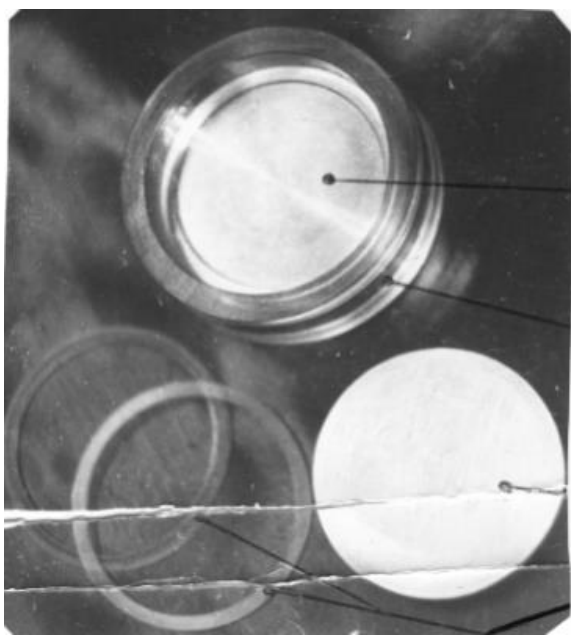


Рис. 2.3 Фотография ячейки для измерения проводимости.

Все перечисленные явления наиболее отчетливо выступают в жидкостях с наиболее высокими изоляционными свойствами ($10^{-13} - 10^{-12}$ Ом·м⁻¹)

Во всех исследованных случаях в области высоких напряжений возникали электрогидродинамические (ЭГД) течения, существенно влияющие на ток через жидкость. Исследования проводились в широком классе различных по молекулярному составу очищенных жидкостей, а также жидкостях со специальными примесями. Все жидкости до исследования подвергались механической очистке путем фильтрации. В ряде экспериментов специально исследовалось влияние искусственно введенных механических примесей на ВАХ. В качестве механических примесей

исследовалась алюминиевая пудра, которая добавлялась в исследуемую жидкость в малой концентрации ($0,01$ г/см³). Список и электрофизические параметры исследованных жидкостей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

№п/п	Жидкость	ом-1м-1	ССТ	кВ/см E1	N1	кВ/смE2	N2
1.	Трансформаторное масло очищенное	$3,1 \times 10^{-12}$	8,7	11,8	2		
2.	Вазелиновое масло очищенное	$1,7 \times 10^{-12}$	108,0	10	2	36	3
3.	Пинен очищенный	$4,1 \times 10^{-12}$	1,98	10	2	40	3
4.	Бензол очищенный	$6,6 \times 10^{-11}$	0,94	10	1,5	30	2
5.	Н-Октан неочищенный	6×10^{-11}	0,9	10	1,5	30	2
6.	Изооктан очищенный	$2,5 \times 10^{-12}$	0,9	10	2	35	3
7.	Петролейный эфир очищенный	$3,75 \times 10^{-11}$	0,82	10	2	38	3
8.	Ксилол очищенный	10-10	0,79	10	1,5	30	
9.	Гексан	$2,33 \times 10^{-10}$	0,75	10	1,5	20	2
10.	Полиметилсилоксан						2
11.	Касторовое масло	4×10^{-11}	1000				
12.	Смесь касторового масла с пиненом (1:1)	$3,75 \times 10^{-10}$	27,0	10	1,3		
13.	Рыбий жир	5×10^{-10}	72,0	10	1,2		
14.	Подсолнечное масло	5×10^{-10}	72,0	10	1,5		
15.	Трансформаторное масло неочищенное	$2,25 \times 10^{-10}$	33,6	10	1,2		
16.	Вазелиновое масло неочищенное	$2,5 \times 10^{-11}$	108,0	10	1,2	28	2
17.	Перфтордекалин C10F18	10-11	1			8	
18.	Ксилол с алюминиевой пудрой	$1,8 \times 10^{-10}$	0,79	10	1,5	35	
19.	Петролейный эфир с алюминиевой пудрой	$1,1 \times 10^{-10}$	0,82	10	2	36	3
20.	Трансформаторное масло с алюминиевой-пудрой	10-10	18,7	10	1,2	25	2

На ВАХ всех исследованных жидкостей можно выделить два основных участка: участок линейного роста тока (низковольтный) и нелинейный (высоковольтный) участок. Нелинейный высоковольтный участок сопровождается возникновением в жидкости электрогидродинамических течений.

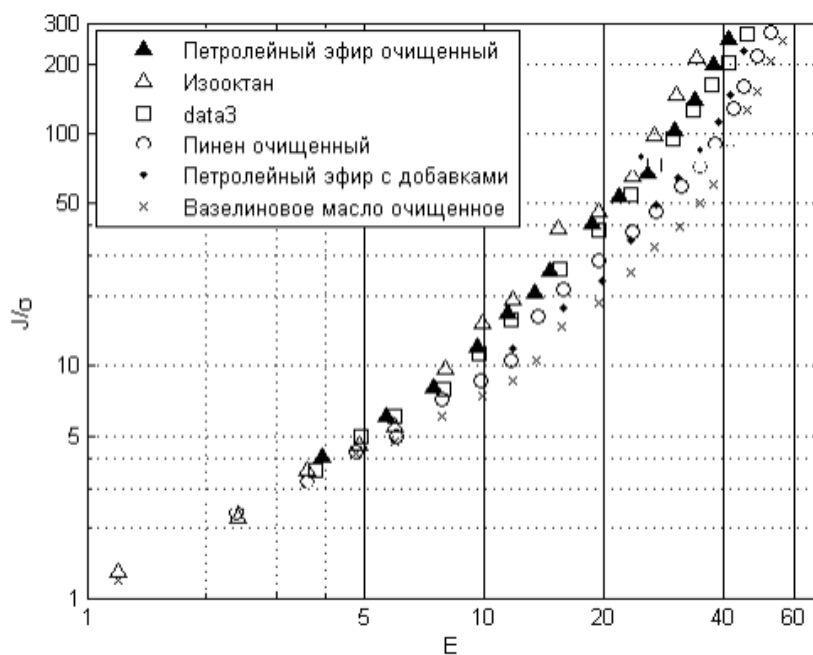


Рис. 2.4 Приведенные вольтамперные характеристики различных жидкостей повышенной очистки-Е кВ/см.

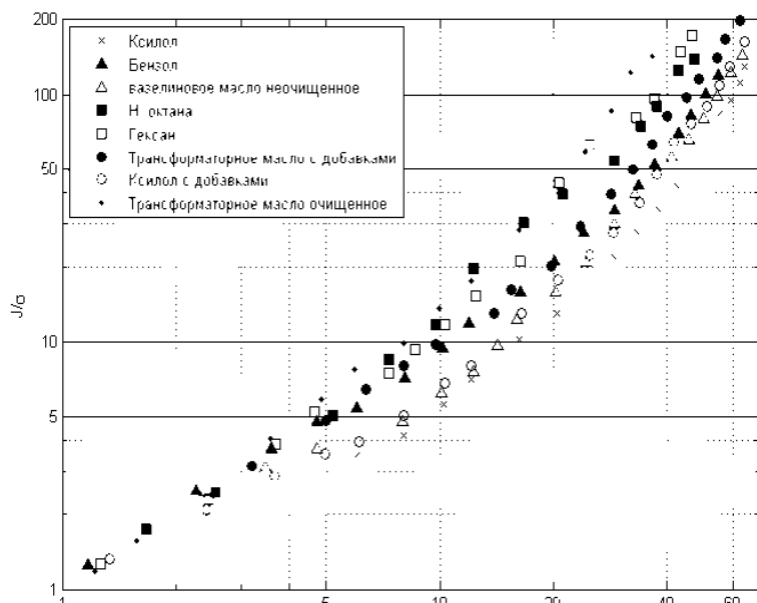


Рис. 2.5 Приведенные вольтамперные характеристики различных жидкостей технической очистки-Е-кВ/см.

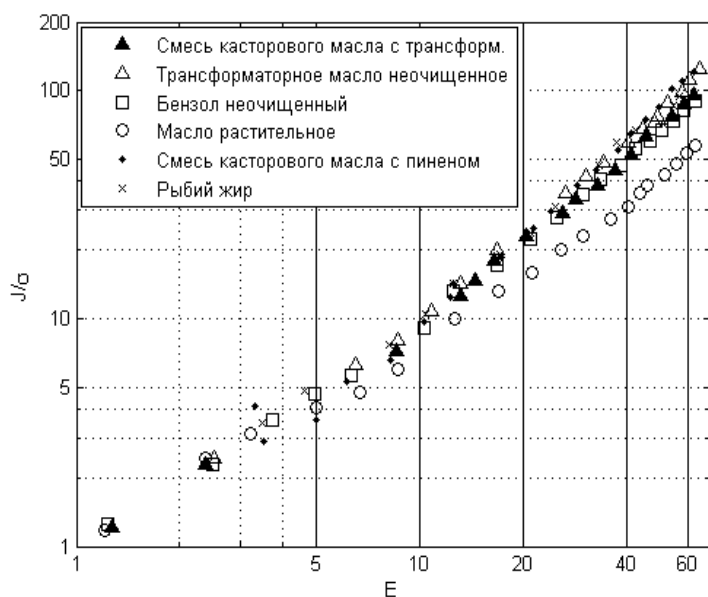


Рис. 2.6. Приведенные вольтамперные характеристики различных жидкостей технической очистки, Е кВ/см.

В низковольтной области ток равен произведению электропроводности ячейки на напряжение $I=R \cdot U$, электропроводность равна R^{-1} . Величина электропроводности постоянна при низких напряжениях и возрастает в области высоких напряжений.

Для удобства ВАХ жидких диэлектриков принято приводить в нормированном виде: на рис. 2.4-6 по оси у отложено отношение плотности тока к значению низковольтной удельной проводимости жидкости, а по оси х средняя напряженность поля в кВ/см. Это позволило совместить начальные линейные участки ВАХ.

В хорошо очищенных жидкостях, проводимостью 10^{-11} – $10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ наблюдаются не две, а три хорошо очерченные области вольтамперных характеристик (рис. 2.16).

а) область выполнения закона Ома,

б) квадратичная область, начиная с некоторого критического напряжения $E_1 = 10 \text{ кВ/см}$,

в) кубическая область, начиная с более высокого критического напряжения $E_2 = 30 \text{ кВ/см}$.

В очищенном перегонкой трансформаторном масле, проводимостью $3,1 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, гексане и n-октане переход от линейной зависимости к квадратичной, наблюдался без ярко выраженной промежуточно области. Как видно из рисунков степень отклонения от линейности весьма существенна. В неочищенных непредельных углеводородах (см. таблицу 2.2) с коэффициентом кинематической вязкости 10^{-1} сСт и электропроводностью $10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, а также маслах с вязкостью 10 – 100 сСт , проводимостью $10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, при напряженностях поля $E_1 = 8$ – 10 кВ/см наблюдается переход от закона Ома, к степенной

квадратичной зависимости при $E_2=25-35$ кВ/см, через выраженный переходной участок с показателем степени $n=1,2-1,5$, (см. рис. 2.16). В неочищенных растительных и технических маслах и рыбьем жире (см. таблицу 2.2), электропроводность которых лежит в пределах $10^{-9}-10^{-10}$ Ом⁻¹ м⁻¹, а коэффициент вязкости составляет 20-80 сСт наблюдались лишь незначительные отклонения от законов Ома, при средних напряженностях электрического поля, превышающих $E_1 = 8-10$ кВ/см (рис. 2.16). При этом тангенс угла наклона вольтамперной характеристики к оси E , т.е. **показатель степени n** спадает при переходе к жидкостям с повышенной проводимостью. Добавление малой дозы взвешенных частиц алюминиевой пудры существенно, иногда на порядок, увеличивает электропроводность первой группы очищенных жидкостей, за счет добавочного электрофоретического механизма проводимости, однако вид вольтамперных характеристик остается неизменным, добавка проводящих частиц алюминиевой пудры в малых дозах не оказывает существенного влияния, как на электропроводность второй и третьей группы жидкости, так и на ход вольтамперной характеристики. Во всех исследованных жидкостях при напряженностях поля выше 10 кВ/см в кювете наблюдалось интенсивное ячеистое течение жидкости-ЭГД- течение.

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о том, что независимо от молекулярного состава жидкого диэлектрика на вольтамперной характеристике хорошо очищенной жидкости наблюдается по крайней мере два участка: участок низковольтной (омической) проводимости, на котором с высокой точностью выполняется линейная связь между током и напряжением и участок высоковольтной проводимости, на котором связь между током и напряжением не линейна. Переход между линейной и нелинейной зависимостями в подавляющем большинстве случаев плавный, а нелинейность выражается степенной функцией. В очищенных жидкостях она квадратична. В некоторых жидкостях в предпробойной области имеется третий участок более сильной (кубической) зависимости тока от напряжения. Чистые жидкости ведут себя практически одинаково. Пороговая средняя напряженность составляет 8–12 кВ/см, а пороговое напряжение 2–3 кВ. Порогу соответствует включение нового механизма высоковольтной проводимости. Отклонения от линейности весьма существенно и значение «высоковольтной проводимости» может в несколько раз превышать значение низковольтной проводимости. С позиций инжекционного механизма проводимости высоковольтный участок обусловлен появлением тока инжекции, который вносит наибольший вклад в жидкостях с пониженным уровнем собственной проводимости.

В то же время поведение недостаточно очищенных жидкостей вносит ощутимые изменения в характер высоковольтной части ВАХ. Во-первых, увеличивается значение низковольтной проводимости и пороговое напряжение, во-вторых, отклонения от линейности становятся менее заметными или пропадают вообще. ЭС позиций инжекционного механизма этот эффект, по видимому, связан с гибелью инжектированных ионов в рекомбинационных слоях (см. главу 3 и 4).

К сожалению, конкретный состав примесей в технических жидкостях практически неизвестен. Считается, что основной примесью, влияющей на характер высоковольтной проводимости, является вода. Однако, вода практически не растворяется в органических жидкостях типа трансформаторного масла и все попытки увеличить его проводимость за счет искусственного растворения воды не привели к успеху даже при помощи кипячения трансформаторного масла с водой.

Особенности характера вольтамперных характеристик и особенности высоковольтной проводимости очищенных жидких диэлектриков в сильно неоднородных электрических полях.

Хорошо известно, что пред пробойные процессы в газах существенно зависят от степени неоднородности электрического поля. В неоднородных полях наблюдается существенный разрыв между началом лавинных процессов и искровым пробоем, а процессы ионизации наблюдается в ограниченной области межэлектродного промежутка (коронный разряд). Поэтому вид ВАХ в газе существенно зависит от степени неоднородности поля [2.6]. Поскольку в жидкости отсутствуют свободный электроны, в них ситуация иная.

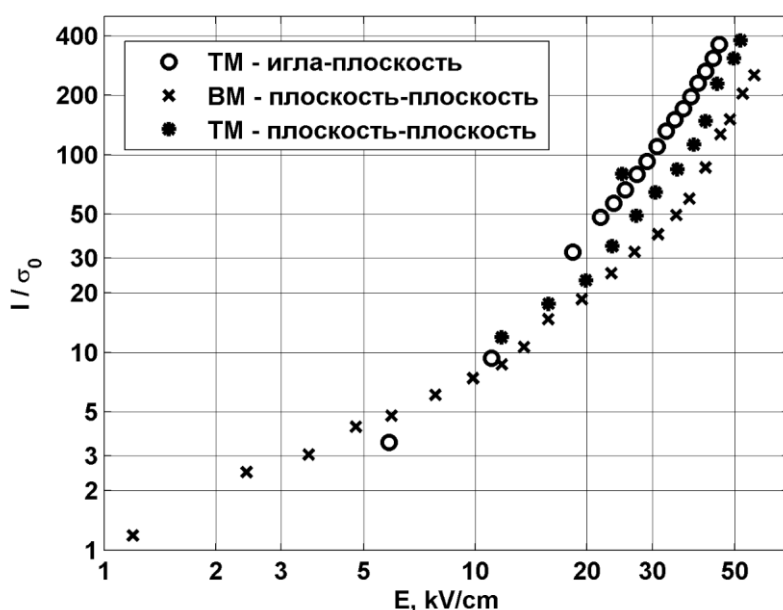


Рис. 2.7 Приведенные вольтамперные характеристики трансформаторного масла для сильно и слабо неоднородных полей.

нии, зависящем от типа исследуемой жидкости и ее проводимости. Аналогичная ситуация наблюдается в электродных системах типа провод-провод, размещенных в канале и системах более сложной геометрии, например, игла-конфузор, используемых в ЭГД-насосах (см.рис.2.18, 19). Таким образом, в отличие от газов изменение степени неоднородности поля и конфигурация электродов не приводит к качественному изменению характера процессов, приводящих к нелинейности ВАХ.

По мнению некоторых авторов, использование микро остриёв, обеспечивающих сверхвысокие локальные электрические поля, должно обеспечить эффективное зарядообразование и эффективные ЭГД-течения даже при относительно низких напряжениях. Однако уменьшении радиуса заострения электрода-иглы до размера порядка единиц микрометров, не привело к новым результатам [2.9]. Характерные значения локальной напряжённости электрического поля в большинстве имеющихся работ не превышали 10^8 В/м в рабочем диапазоне напряжений. В данной работе благодаря малому радиусу электрода удалось обеспечить локальные напряжённости электрического поля как минимум на порядок выше. При межэлектродной разности потенциалов 15 кВ на кончике электрода иглы максимальная напряженность электрического поля достигает значений около 10^9 В/м, что близко к уровню внутриатомных полей. Можно ожидать, что в таких сверхсильных элек-

На рис. 2.7 приведены в би логарифмическом масштабе ВАХ в системе электродов игла-плоскость и плоскость-плоскость в трансформаторном масле. Также, как и в квази-однородном поле в системе игла – плоскость, наблюдается два участка: низковольтный линейный участок и высоковольтный нелинейный участок. Переход от линейного участка к нелинейному наблюдается при пороговом напряже-

трических полях возможно проявление новых эффектов. Во-первых, становится возможной автоэлектронная эмиссия в жидкость с последующей локализацией электронов в так называемых электронных пузырях. Во-вторых, в столь сильных полях должен проявиться эффект Вина, что в свою очередь должно изменить структуру возникающих в жидкости ЭГД-течений. В качестве хорошо очищенного диэлектрика использовалось вазелиновое масло с низковольтной проводимостью $\sigma = (2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Соответствующее время Максвелловской релаксации составляет около 700 с. Вольтамперные характеристики (ВАХ) исследуемой системы были получены как в стационарном, так и в динамическом режиме (рис. 2.8), то есть при модуляции напряжения пилообразным сигналом с различными скоростями модуляции. Благодаря автоматизации процесса получения и обработки ВАХ измерения проводились многократно, что позволило убедиться в воспроизводимости соответствующих результатов. Снятые динамические ВАХ были сопоставлены с ВАХ, полученными обычным способом, когда значения тока измерялись при фиксированных напряжениях после завершения всех переходных процессов. Измерения тока производились при помощи пико амперметра Keithley 6485, что позволило измерять токи порядка пико ампер, начиная с напряжений в несколько сотен вольт.

На рис.2.8 приведены ВАХ снятые вручную и записанные автоматически при изменении напряжения со скоростью 0,5 и 5 кВ/с. Уровни токов при напряжении 25 кВ невелики – порядка 100 нА, что по порядку соответствует токам в плоскопараллельной ячейке.

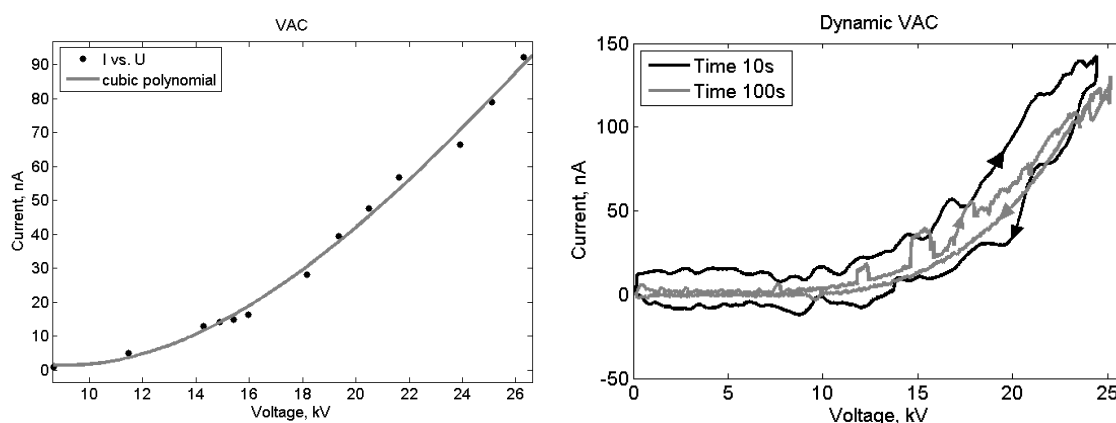


Рис. 2.8. Стационарная(слева) и динамические(справа) вольтамперные характеристики $I(U)$, снятые при двух скоростях изменения напряжения 5 кВ/с и 0,5 кВ/с).

Метод динамических ВАХ.

Применение ВАХ, получаемой при модуляции напряжения пилообразным сигналом, для исследования высоковольтной проводимости диэлектрической жидкости было предложено автором [2.5], где соответствующие данные были названы динамическими ВАХ. Такой подход имеет ряд: преимуществ перед снятием классических ВАХ. Первым и самым главным преимуществом является быстрота получения данных, поскольку здесь не требуется ожидание выхода тока на стационарное значение при каждом напряжении, что может занимать часы и даже дни. Как следствие, весь процесс измерения проходит при фиксированных внешних условиях и, в частности, при постоянной температуре, изменение которой сильно влияет на проводимость жидкости. Кроме того, быстрота получения данных позволяет проверять воспроизводимость результатов, что имеет большое значение в виду сложности и нестабильности процессов токопрохождения в слабо проводящих

жидкостях. Далее, быстрота снятия ВАХ снижает вероятность проявления случайных флуктуаций тока, вызываемых механическими примесями (ворсинками), поскольку последние, как правило, не успевают попасть в при электродную область за короткий период модуляции напряжения. Помимо всего прочего, динамические ВАХ (в отличие от классических) несут в себе дополнительную информацию, которая и используется в настоящей работе для определения доминирующего механизма зарядообразования. В ранних работах ДВАХ регистрировались при помощи двух координатного самописца. Современная установка для исследования ДВАХ содержит компьютер [2.10-13]. Напряжение и ток измеряются при помощи двух отдельных быстродействующих АЦП. Для визуального контроля отсутствия механических примесей вблизи острия иглы в момент измерений межэлектродный промежуток подсвечивается лучом лазера и снимается видеокамерой.

Важной особенностью предлагаемой экспериментальной методики является необходимость разделения двух компонент тока – ёмкостной и ионной:

$$I = I_c + I_{ion}$$

Первая компонента связана с тем, что к системе прикладывается изменяющееся напряжение, и в электрической цепи протекает ток:

$$I_c = C \frac{dV}{dt}$$

где C – это ёмкость системы электродов, V – напряжение. Эта компонента тока не связана с движением ионов в межэлектродном промежутке, и определяется геометрией системы электродов. Этот ток будет протекать, даже если в ячейке не будет жидкости. Наличие жидкости в ячейке влияет на ёмкостной ток только за счёт диэлектрической проницаемости, увеличение которой приводит к увеличению ёмкости C . В свою очередь, вторая компонента представляет собой ток, обусловленный движением ионов в межэлектродном промежутке. Это именно та часть тока, которая характеризует высоковольтную проводимость жидкости. Таким образом, чтобы определить ионный ток, ёмкостная компонента должна быть вычтена из полного значения тока.

Определим, когда ёмкостной ток следует принимать во внимание и как его вычислять. Характерное значение ёмкости лабораторной системы электродов имеет порядок 1 пФ, что при скорости модуляции напряжения 10 кВ/с приводит к появлению ёмкостного тока около 10 нА. Т. о., учёт этой компоненты тока необходим при уровне ионного тока менее 1 мкА. Для получения точного значения ёмкостного тока необходимо, во-первых, измерить напряжение и вычислить его производную по времени, и, во-вторых, определить ёмкость системы электродов. Последняя может быть найдена численно при помощи компьютерного моделирования, если известно точное значение диэлектрической проницаемости и точные параметры геометрии электродов. Однако значительно удобнее определять ёмкость экспериментально. Для этого нужно подать на электроды короткий импульс напряжения с достаточно малой амплитудой (такой, чтобы не активировать высоковольтные МЗО), и с коротким передним фронтом. Тогда ток, протекающий в первый момент времени, будет иметь только ёмкостную составляющую. Следовательно, ёмкость системы будет равна отношению полного тока к производной от напряжения. Учитывая, что на реальный экспериментальный сигнал накладываются шумы, для более точного определения ёмкости нужно провести вычисления для небольшого интервала времени и вычислить среднее значение. Описанный подход позволяет определять ёмкость системы в рамках одного экспериментального стенда, что делает методику исследования ДВАХ более удобной.

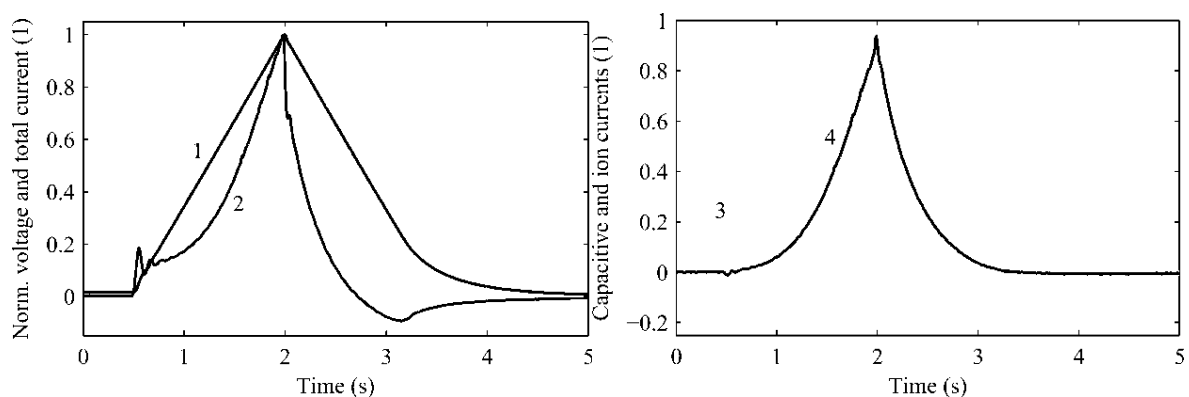


Рис. 2.9 Исходные осциллограммы нормированных напряжения и тока (слева) и вычисленные ёмкостная и ионная компоненты тока (справа).

На рис. 2.9 представлены типовые экспериментальные осциллограммы для системы электродов провод-плоскость и рабочей жидкости чистого трансформаторного масла: 1 – напряжение, 2 – полный ток, 3 – ёмкостная компонента тока (вычисленная по описанной выше методике) и 4 – ионный ток; все осциллограммы нормированы на максимальные значения напряжения и тока. В данном случае, напряжение изменялось от нуля до 20 кВ и обратно за 3 с, что соответствует скорости модуляции около 15 кВ/с. Полный ток (кривая 2) резко возрастает в первый момент возрастания напряжения, что обусловливается ёмкостной компонентой, представленной на рис. 2.9 (кривая 3). Далее с дальнейшим увеличением напряжения происходит плавное увеличение тока, обусловленное ростом ионного тока (кривая 4). В момент начала снижения напряжения ёмкостной ток меняет знак, и на осциллограмме полного тока наблюдается резкий скачок.

ДВАХ в сильно неоднородных электрических полях.

Приведем результаты современных исследований ДВАХ чистых жидкостей [2.9-10]. На рис.2.9 приведены осциллограммы напряжения и тока проводимости т.е. измеренного тока с вычетом емкостного тока. (кривые 1 и 4 на рис. 2.9). По ним можно построить непосредственно саму ДВАХ для системы электродов игла над плоскостью в чистом трансформаторном масле (рис. 2.10, кривая 1). Она имеет следующий вид. Вначале (от 0 до 7 кВ) наблюдается приблизительно линейный рост тока, где выполняется закон Ома. На этом участке главным механизмом зарядообразования является само диссоциация молекул примесей в объёме, а главным механизмом переноса ионов – миграция в электрическом поле. (Подробно механизмы зарядообразования будут рассмотрены в главах 3–5) И далее начинается участок ускоренного роста тока, что соответствует активации высоковольтных механизмов зарядообразования МЗО (инжекция или диссоциация, усиленная электрическим полем). Особенностью полученной экспериментальной ДВАХ является различие между значениями тока при повышении и понижении напряжения, отмеченных на ДВАХ стрелками, т.е. т.н. гистерезис. Наличие гистерезиса, а также зависимости характера ДВАХ от скорости модуляции (кривая 1 и 2 на рис. 2.10) свидетельствует о том, что характерное время установления процессов токопрохождения превышает характерное время изменения напряжения, и система не успевает подстраиваться под изменяющиеся условия. Помимо прочего, на ДВАХ, снятой при малой скорости модуляции напряжения (1.5 кВ/с) при напряжениях более 15 кВ наблюдаются флуктуации тока, что, согласно моделированию (см. главу 5), является характерной чертой доминирования инжекционного

механизма зарядообразования. Отдельный выброс на ДВАХ (кривая 2, при напряжении 15 кВ) обусловлен случайным попаданием механической примеси в область максимальной напряжённости электрического поля.

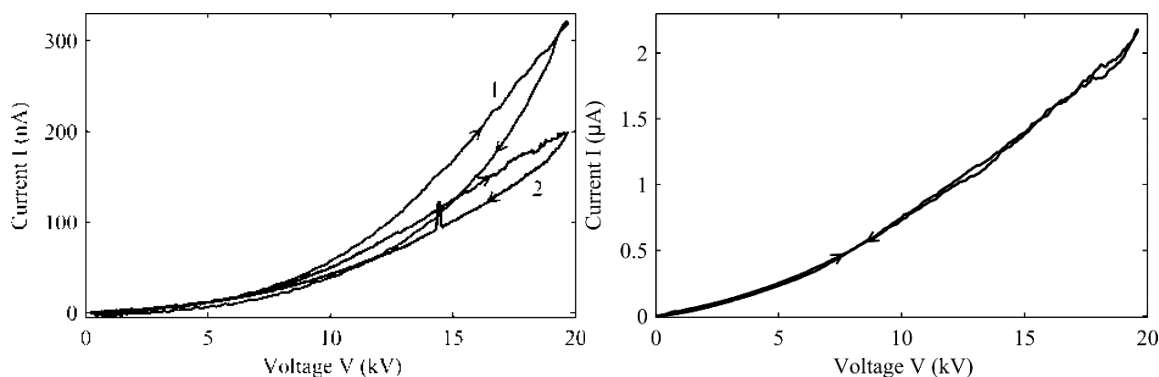


Рис. 2.10. ДВАХ для чистого ТМ: *a*– при разных скоростях модуляции (1 – 15 кВ/с, 2 – 1.5 кВ/с); *b*– при увеличении проводимости жидкости за счёт добавления 5% бутанола (скорость модуляции 15 кВ/с).

Степень отклонения от линейности, также, как и для системы плоских электродов, достаточно велика. Как следует из данных приведенных в главе 5 по компьютерному моделированию ДВАХ, характерными временами являются время пересечения заряженной струёй МЭП и время накопления заряда в объёме. Первое отвечает за наличие гистерезиса, а второе – за спад тока при увеличении периода модуляции (что согласуется с тем, что кривая 2 расположена ниже, чем кривая 1). Как показано в этих же разделах, гистерезис появляется только в случае доминирования инжекционного механизма зарядообразования и в жидкостях с пониженным уровнем низковольтной проводимости, когда характерное время Максвелловской релаксации:

$$\tau = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma_0$$

больше периода модуляции. Аналогичная закономерность наблюдается и в экспериментальных данных – при повышении проводимости за счёт введения в чистое трансформаторное масло электроноакцепторной примеси (5% бутанола) гистерезис исчезает (рис. 3*b*). Соответствующее время Максвелловской релаксации для этой жидкости, проводимость которой имеет порядок 10^{-10} См/м, составляет около 0.1 с, а изменение напряжения на 1 кВ происходит за 0.2 с. Т. о. релаксация объемного заряда в течении процессов токопрохождения происходит быстрее, чем напряжение успевает измениться на заметную величину. Стоит отметить, что также, как и в предыдущем случае на ДВАХ при высоких напряжениях наблюдаются флуктуации тока.

Рассмотрим экспериментальные ДВАХ, полученные в системе электродов игла-плоскость с чистым вазелиновым маслом (ВМ) в качестве рабочей жидкости (рис. 2.11). Поскольку ВМ обладает очень низкой низковольтной проводимостью (менее 10^{-13} См/м), то ток проводимости в низковольтной области зарегистрировать не удастся. Это позволяет исследовать именно высоковольтную проводимость, обусловленную активацией инжекционного зарядообразования или проявлением эффекта Вина. Кроме того, спецификой исследуемой системы электродов является использование очень острой иглы (с диаметром закругления 15 мкм) в качестве высоковольтного электрода, благодаря чему локальная напряжённость электрического поля (у заострения иглы) при повышении напряжения может превысить значение 10^8 В/м до того, как в жидкости произойдёт электрический про-

бой. Также, как и в системе с плоскими электродами перед началом измерений к системе электродов на десять минут прикладывалось высокое напряжение, что позволило получить в дальнейшем стабильные и воспроизводимые данные.

На рис. 2.11 *a* представлены ДВАХ, полученные при положительной полярности игольчатого электрода при разной скорости модуляции напряжения – от 2 до 20 кВ/с. Полученные зависимости очень близки друг к другу, т.е. не зависят от скорости изменения напряжения и все они имеют следующие характерные черты. Уровень токов мал: 20 нано ампер при 25 кВ. На ДВАХ практически не заметен линейный омический участок, а заметный ток возникает только лишь при напряжении выше 15 кВ, и имеет очень крутую зависимость от напряжения. В отличие от трансформаторного масла (рис. 2.10), здесь нет гистерезиса, а сами характеристики не зависят от скорости модуляции напряжения. При смене полярности напряжения на отрицательную вид ДВАХ заметно изменяется (рис. 2.11 *b*). На них по-прежнему не заметен линейный омический участок, однако уровень токов значительно выше, рост тока начинается с меньшего напряжения (около 8–10 кВ), величина токов и крутизна роста высоковольтного тока несколько увеличивается, появляется различие между значениями тока при росте и спаде напряжения и, наконец, полученные характеристики зависят от скорости модуляции напряжения. С увеличением скорости роста напряжения уровень токов растет. Помимо прочего, уровень тока возрастает практически на порядок по сравнению с положительной полярностью.

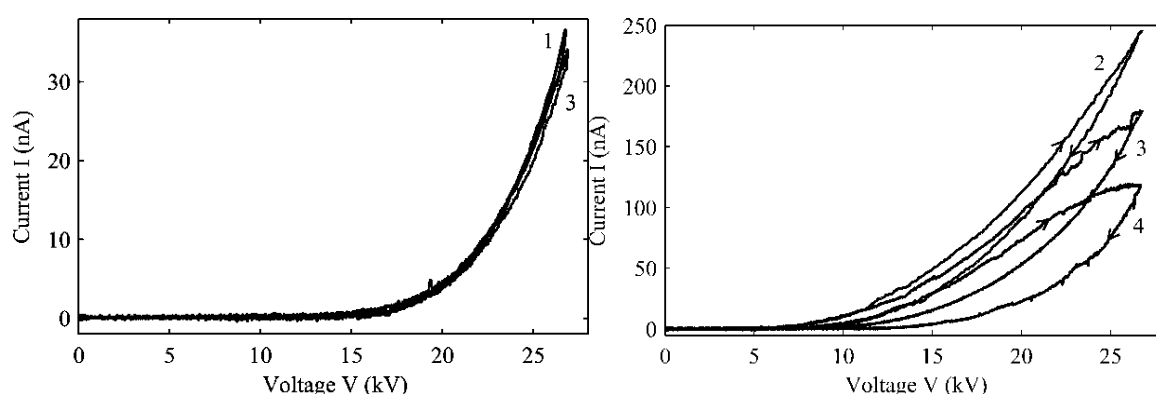


Рис. 2.11. ДВАХ в ВМ при положительной (слева) и отрицательной (справа) полярностях при разных скоростях модуляции напряжения: 1 – 20 кВ/с, 2 – 6 кВ/с, 3 – 2 кВ/с и 4 – 0.6 кВ/с.

Таким образом, можно сделать предположение, что при положительной полярности игольчатого электрода, ДВАХ, представленные на рис. 4*a*, относятся к случаю проявления эффекта Вина, в то время как при отрицательной полярности игольчатого электрода, ключевую роль играет инжекция. Наличие инжекционного зарядообразования при отрицательной полярности также подтверждается тем, что рост тока в этом случае начинается при меньшем напряжении, чем при положительной полярности, что возможно, только если зарядообразование зависит от полярности. А эффект Вина, как известно, зависит только от модуля напряжённости электрического поля. Помимо прочего, полученные данные не противоречат тому, что если при положительной полярности проявляется эффект Вина, то он должен проявиться и при отрицательной, поскольку ток при отрицательной полярности значительно выше и вполне может быть суммой токов инжекции и повышенной диссоциации.

Влияние примесного состава жидкостей на характер ВАХ [2.5, 2.7].

При очистке диэлектрических жидкостей основное внимание уделяется их фильтрованию и высушиванию. Как правило, остаточный примесный состав технических жидкостей остается неизвестным. Поскольку в обычных жидких диэлектриках примесный состав, влияющий на процессы высоковольтной проводимости, определить практически невозможно, была проведена работа по поиску примесей, существенно изменяющих электрофизические свойства основной, хорошо очищенной диэлектрической жидкости. Хорошо известно, что электропроводность воды существенно изменяется при растворении в ней солей. Соли практически полностью распадаются на ионы в момент растворения, изменяя электропроводность воды на несколько порядков. Если удельная проводимость дистиллированной воды равна 10^{-6} сим/м, то удельная проводимость раствора поваренной соли в воде может достигать единиц и десятков сим/м. При этом, поваренная соль полностью распадается на ионы натрия и хлора. В жидких диэлектриках это не так. Обычно в неполярных жидкостях растворимость солей невелика. Кроме того, степень диссоциации примесей обычно значительно меньше единицы. Считается, что наибольшее влияние на проводимость углеводородов оказывает вода. Однако попытки растворения воды в углеводородах не приводят к значительному увеличению проводимости исходной жидкости даже при кипячении смеси трансформаторное масло + вода. Была проведена работа по поиску примесей, растворяющихся в органических углеводородах. Список найденных примесных добавок приведен в таблице 2.2. В качестве примесей использовались вещества, растворимые в исходной жидкости. Критерием при выборе примесей были растворимость в исследуемой жидкости, электронно-акцепторные свойства молекул, влияние на низковольтную проводимость. Некоторые из примесей практически не влияли на электрофизические свойства исходной жидкости: электропроводность и диэлектрическую проницаемость. Были найдены примеси, растворимые в исходной жидкости и существенно изменяющие как низковольтную электрическую проводимость жидкости, так и высоковольтную проводимость. Приведенные результаты касаются подобных примесей. В качестве основы в различных экспериментах использованы различные диэлектрические жидкости: трансформаторное масло, изооктан, вазелиновое масло, касторовое масло, перфтордекалин и др. Исследования проводились в электрических полях различной степени неоднородности. Проведено несколько серий экспериментов. В первой серии для исключения влияния геометрического фактора все эксперименты проведены в системе электродов провод над плоскостью. Во всех экспериментах первой серии проволока была выполнена из меди, и на нее подавался отрицательный потенциал.

При инъекционном механизме появления ионов возможные реакции рождения ионов на поверхности проволочного электрода могли протекать по схеме: $(C + e = C^-)$, где C молекула примеси, обладающая повышенными электронно-акцепторными свойствами. В такой системе реакция рождения (инъекции) ионов из примесных молекул должна протекать преимущественно у проволочного электрода, поскольку там напряженность поля существенно повышена. За опорный заземленный электрод была взята медная пластина.

В первой серии объектом исследований был выбран хорошо очищенный изооктан, обладающий предельно малой собственной низковольтной проводимостью 5×10^{-13} (Ом м)⁻¹. Если ион образуется у катода путем перехода электрона с поверхности металла на

молекулу примеси, то интенсивность ионообразования определяется разностью между работой выхода и энергией сродства к электроду молекул примеси.

Задачей первой серии экспериментов был рациональный выбор примесей, существенно влияющих на низковольтную проводимость жидкости и растворяющихся в исходной жидкости. Поскольку исследование касалось воздействия ряда примесей на интенсивность зарядообразования на катоде, то критерием отбора примесей было также повышенное сродство к электрону. Повышенным сродством к электрону обладают элементы УП группы таблицы Менделеева, которые имеют УП электронов на внешнем энергетическом уровне. Наиболее приемлемыми оказались галогены, хорошо растворимые в неполярных растворителях. Сродство к электрону галогенов: бром (**Br**) – **3,4 эВ**; хлор (**Cl**) – **3,8 эВ**; йод (**I**) – **3,2 эВ**. Сродство к электрону химических соединений изучено хуже. В некоторых соединениях сродство к электрону определяется наличием активных групп: гидроксильной (**ОН**) – **2,7 эВ**; аминогруппы (**NH₂**) – **1,2 эВ**.

Поэтому в числе примесей, обладающих повышенными электронно-акцепторными свойствами выбраны: йод, α - лейцин, бутиловый спирт, тетрабромэтилен, йодное олово.

Для хорошего хода реакции ионообразования у катода и у анода необходимо использовать примеси, обладающие амфотерными свойствами, т.е. цвитер - ионы. Известно, что амфотерными свойствами обладает α - лейцин.

Кроме того, можно испробовать соли – соединения элементов I и УП группы элементов таблицы Менделеева: элементы I группы обладают электронно-донорными свойствами, элементы УП группы - электронно-акцепторными свойствами.

Известно, что в водных- электролитах соли существенно изменяют электропроводность воды, практически полностью распадаясь при растворении на ионы. В жидких диэлектриках ситуация иная. Как оказалось, традиционные соли не растворяются в исходной жидкости, исключение составило йодное олово, однако степень диссоциации последнего также оказалась ничтожной. Некоторые из использованных примесей, приведенных в таблице 2.2 повышали электропроводность исходной жидкости, однако степень диссоциации молекул примесей оказалась ничтожной. Так, например, при растворении йода в трансформаторном масле его низковольтная проводимость линейно росла с увеличением концентрации йода, однако степень диссоциации йода оказалась крайне мала: одна миллионная. Таким образом, растворенный йод оставался в растворе в основном в молекулярном виде. Об этом же свидетельствовала и окраска растворов йода.

Таблица 2.3

Жидкость	Проводимость Ом ⁻¹ м ⁻¹	Концентрация примеси/см ³	Примечания
Изооктан очищенный	5 x 10 ⁻¹³	0	
Изооктан + бутанол	5,7 x 10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹	Бутанол - C ₄ H ₉ OH
Изооктан + альфа лейцин	3 x 10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁴	(CH ₃) ₂ CH-CH ₂ -CH-COOH NH ₂
Изооктан +тетрабром этилен	3 x 10 ⁻¹¹	10 ⁻³	Br(OH) ₄
Изооктан +йодное олово	10 ⁻¹⁰	10 ⁻²	Sn J ₂
Изооктан + йод	3 x 10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁴	J ₂
Изооктан + йодистый аммоний	3 x 10 ⁻¹²		Растворяется плохо
Изооктан + моно хлоргидрин-глицерин	5 x 10 ⁻¹³		Не растворяется
Изооктан +фенолфталеин	5 x 10 ⁻¹⁵		Не растворяется
Изооктан + камфорнаякислота	3 x 10 ⁻¹³		Не растворяется

Изооктан + изопропиловый эфир масляной кислоты	2×10^{-12}	
Изооктан + трифенил хлорметан	3×10^{-12}	Плохо растворяется
Изооктан + фруктоза	2×10^{-13}	Не растворяется
Изооктан + бета-лейцин	5×10^{-13}	Не растворяется

Аналогичная ситуация наблюдалась и для других использованных примесей. Как видно из таблицы 2.2 лишь альфа лейцин, йод, бутанол, йодное олово и тетрабромэтилен заметно изменяли низковольтную проводимость изооктана. Остальные примеси практически не влияли на нее. Степень диссоциации всех использованных примесей оказалась ничтожно малой. Таким образом, в отличие от водных электролитов, в которых диссоциация практически полная, в жидких диэлектриках ситуация иная и их следует считать очень слабыми электролитами.

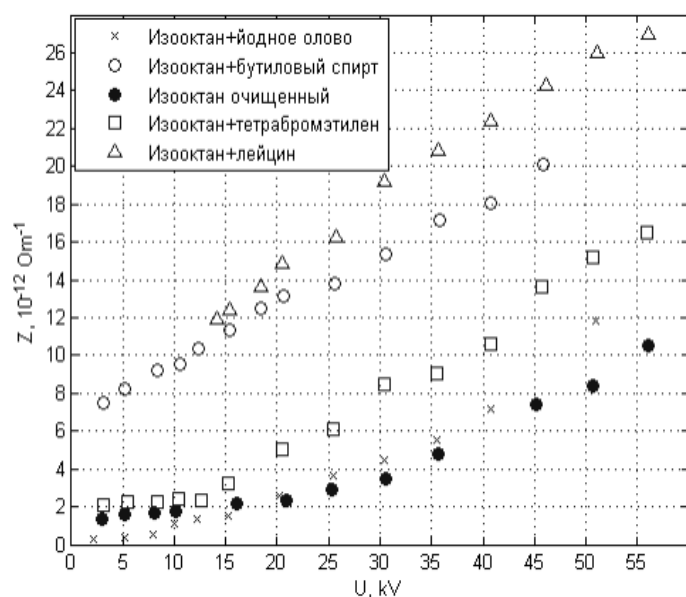


Рис.2.12. Зависимость проводимости Z кюветы от напряжения на электродах (провод-медь над плоскостью-медь) в изооктане с различными примесями.

примесных молекул крайне мала. На рис. 2.12 приведены ВАХ чистого изооктана и с примесными добавками в широком диапазоне напряжений **0,1–30 кВ**. Поскольку на высоковольтном участке зависимость тока от напряжения нелинейная, то для удобства анализа результатов ВАХ построены в следующем приведенном виде. По оси u отложена зависимость обратного сопротивления, т.е. проводимости исследуемой ячейки, а по оси x — напряжение. Это позволяет строить и анализировать ВАХ не в би логарифмическом, а в обычном линейном масштабе. Приведенные ВАХ имеют два участка: низковольтный участок постоянной низковольтной проводимости, на котором выполняется закон Ома, а низковольтная проводимость $Z = \text{const.}$ не зависит от напряжения и высоковольтный участок на котором Z растет с ростом напряжения. Видно, что в чистом изооктане переход к высоковольтному участку осуществляется при достаточно высоком напряжении: выше **20 кВ**. Влияние примесей весьма существенно. Особенно значительно влияние α -лейцина и бутанола. Введение примеси с одной стороны, снижает напряжение перехода от низковольтного линейного участка ВАХ к высоковольтному участку, а с другой стороны обеспечивает более высокие токи на высоковольтном участке. Зависимости проводимости ячейки Z от напряжения на высоковольтном участке, для большинства примесей линейные, т.е. обычная, не приведенная ВАХ — описывается квадратичной зависимостью.

Диссоциация примесей происходит при растворении, в жидких диэлектриках молекулы примесей диссоциируют крайне слабо, а молекулы примесей создают благоприятные условия для усиления реакции ионообразования (инжекции) на поверхности электрода. Опыты показали, что ионообразование на электроде начинается с некоторого порога и определяет ход высоковольтной части ВАХ. Что касается повышения низковольтной проводимости, то она по-видимому связана с термической само диссоциацией растворенной примеси. Однако степень диссоциации

Следующая группа исследований касалась изучения влияния растворения примесей на вольтамперную характеристику хорошо очищенного трансформаторного масла. В таблице 2.3 приведены примеси, растворяющиеся в трансформаторном масле и влияющие на его электрофизические свойства. В некоторых экспериментах в качестве основы использовалось вазелиновое и касторовое масла. В качестве основных примесей использован йод, имеющий повышенное сродство к электрону, а также полярные добавки: бутанол и ацетон. В отличие от воды, эти добавки растворяются в трансформаторном масле и существенно изменяют его проводимость. На рис. 2.12 представлены зависимости низковольтной электропроводности трансформаторного масла от концентрации йода и бутанола. Видно, что йод в малых концентрациях, существенно повышает низковольтную удельную электропроводность масла, причем зависимость низковольтной проводимости от концентрации линейна. Однако при концентрации 10^{-4} растворы йода оптически непрозрачны, что существенно затрудняет их исследование.

Бутанол также хорошо растворяется и существенно влияет на низковольтную проводимость трансформаторного масла, изменяя ее на несколько порядков, однако необходимые концентрации бутанола существенно выше и могут достигать 10-30%. (см. табл.2.3). Степень диссоциации бутанола также крайне мала. На проводимость трансформаторного масла существенно влияют также ацетон и олеиновая кислота. Проводимость касторового масла можно существенно увеличить при помощи гидролизного спирта. Йод практически не изменяет диэлектрическую проницаемость трансформаторного масла, а бутанол ощутимо повышает ее.

Таблица 2.3

№ п/п	Состав жидкости	Проводимость $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	Диэлектрическая проницаемость	Вязкость Сст
1	Трансформаторное масло	10^{-12}	2,15	25(20°C)
2	Раствор йода в трансформаторном масле $2,5 \times 10^{-5} \text{ г/см}^3$	$1,2 \times 10^{-11}$	2,15	25(20°C)
3	Раствор йода в трансформаторном масле $0,5 \times 10^{-4} \text{ г/см}^3$		2,15	25(20°C)
4	Раствор йода в трансформаторном масле $1,3 \times 10^{-4} \text{ г/см}^3$	7×10^{-11}	2,15	25(20°C)
5	Раствор йода в трансформаторном масле $2,5 \times 10^{-4} \text{ г/см}^3$		2,15	25(20°C)
6	Раствор № 4 + бутиловый спирт 5%	2×10^{-10}	2,4	22(20°C)
7	Раствор № 4 + ацетон 2%	$2,5 \times 10^{-10}$		25(20°C)
8	Раствор № 4 + бутиловый спирт 8%	6×10^{-10}	2,5	21(20°C)
9	Раствор № 4 + бутиловый спирт 10%	$1,2 \times 10^{-9}$	2,6	20(20°C)
10	Раствор № 4 + ацетон 5%	$1,3 \times 10^{-8}$		25(20°C)
11	Раствор № 4 + бутиловый спирт 20%	$7,3 \times 10^{-8}$	3,2	8,5(36°C)
12	Касторовое масло +бутиловый спирт 20%	$8,7 \times 10^{-8}$	6,6	24(60°C)
13	Касторовое масло +бутиловый спирт 30%	$3,3 \times 10^{-7}$	8,7	18(60°C)
14	Касторовое масло +гидролизный спирт 10-15%	10^{-6}		
15	Трансформаторное масло очищенное	10^{-12}	2,16	25
16	Раствор йода в трансформаторном масле $5 \times 10^{-5} \text{ г/см}^3$	$1,2 \times 10^{-11}$	2,16	25
17	Раствор йода в трансформаторном масле $2,5 \times 10^{-5} \text{ г/см}^3$	$0,6 \times 10^{-11}$	2,16	25

18	Раствор йода в трансформаторном масле 10^{-4} г/см ³	2×10^{-11}	2,16	25
18	Раствор йода в трансформаторном масле $2,5 \times 10^{-4}$ г/см ³	5×10^{-11}	2,16	25
19	Раствор бутилового спирта в трансформаторном масле 1%	10^{-11}		
20	Раствор бутилового спирта в трансформаторном масле 2,5%	2×10^{-11}		
21	Раствор бутилового спирта в трансформаторном масле 5%	3×10^{-11}	2,3	23
22	Раствор бутилового спирта 5% и 10^{-4} г/см ³ в трансформаторном масле	2×10^{-10}	2,3	23
23	Раствор бутилового спирта в трансформаторном масле 10%	10^{-10}	2,1	18
24	Раствор бутилового спирта 10% и 10^{-4} г/см ³ в трансформаторном масле	10^{-11}	2,3	23
25	Раствор бутилового спирта в трансформаторном масле 20%	10^{-9}	3,2	10
26	Раствор бутилового спирта 20% и 10^{-4} г/см ³ в трансформаторном масле	7×10^{-8}	3,2	10
27	Раствор бутилового спирта в трансформаторном масле 25%	4×10^{-8}		
28	Раствор бутилового спирта в трансформаторном масле 30%	10^{-7}	4,2	7
29	Касторовое масло	10^{-10}	4,5	1000
30	Раствор бутилового спирта в касторовом масле 20%	10^{-7}		
31	Раствор бутилового спирта в касторовом масле 40%	5×10^{-7}		18/70°C/
32	Вазелиновое масло	10^{-12}		100
33	Раствор гидролизного спирта в касторовом масле	10^{-6}		25
34	Раствор бутилового спирта 5% и олеиновой кислоты 5% в трансформаторном масле	5×10^{-10}		
35	Раствор бутилового спирта 5% и олеиновой кислоты 10% в трансформаторном масле	5×10^{-10}		

Для изучения зависимости степени отклонения от линейности высоковольтного участка ВАХ удобнее от традиционных ВАХ перейти к их приведенному безразмерному виду. Для этого необходимо в качестве единицы измерения тока выбрать ток проводимости $i_{пр}$. Тогда обозначив безразмерный ток буквой I получим $I = I / i_{пр}$. Безразмерные ВАХ, т.е. зависимости безразмерного тока I от напряжения U , построенные по результатам измерений, приведены на рис. 2.13. Эти зависимости удобнее обычных, т.к. позволяют легко определять основные особенности проводимости жидких диэлектриков и компактно представлять многочисленные результаты на одном графике, что очень удобно для сравнения данных. Поскольку влияние инъекции различно в жидкостях различного состава подобное представление позволяет оценить степень влияния инъекции в жидкостях различного состава, а также определить влияние инъекции при низковольтной проводимости жидкости.

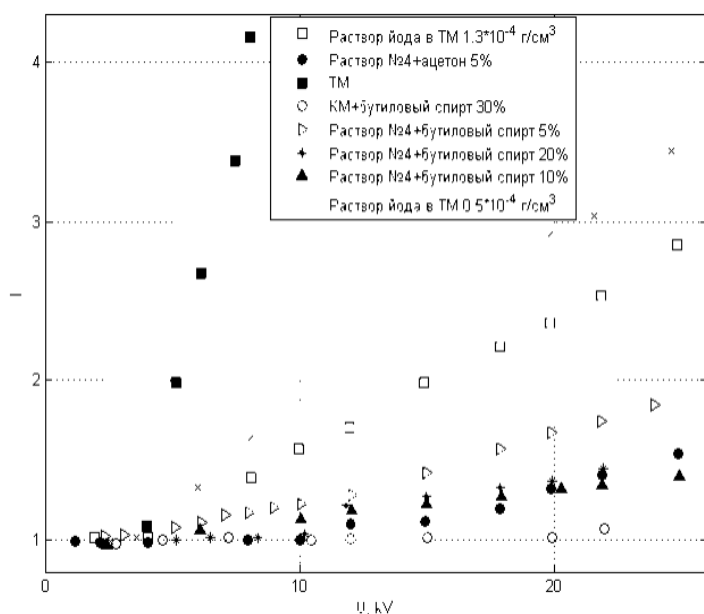


Рис.2.13. Приведенная ВАХ для различных примесей в трансформаторном масле.

ности очень высоки, с увеличением концентрации примесей низковольтная проводимость растет, а отклонения от линейности ВАХ спадают, а в жидкостях, содержащих примеси высоких концентраций и обладающих существенно повышенной низковольтной проводимостью, отклонений от линейности практически не наблюдается. В целом картина ВАХ в жидкостях с известным примесным составом полностью соответствует ВАХ измеренным в однородном поле в различных по составу жидких диэлектриках с неизвестным составом примесей. Это позволяет предположить, что нелинейности ВАХ имеют единую природу и связаны с появлением инжекционного механизма рождения ионов на поверхности электрода (инжекции) и появлением конвективного механизма проводимости. Для анализа этого механизма необходима информация о конвективном механизме переноса заряда и ЭГД-течениях, приведенная далее в главе 3-6.

Зависимость характера ВАХ от материала электродов в изоктане.

В предыдущем параграфе мы установили, что примеси в жидких диэлектриках диссоциируют чрезвычайно слабо и присутствуют в основном в молекулярном виде. Поскольку в процессе приэлектродного рождения ионов: $C + e = C^-$, участвует с одной стороны молекула примеси C , а с другой стороны поверхность электрода, с которой выходит электрон, то следует ожидать существенного влияния свойств поверхности электрода, например, его материала на характер ионообразования, а, следовательно, и на высоковольтный участок ВАХ.

Приведем результаты систематического исследования влияния материала электродов на характер ВАХ [2.7]. Исследования проведены для различных условий при различной геометрии электродной системы. Исследовались жидкости, как в закрытых кюветах, так и в каналах, имеющих сквозную прокачку. Основная группа исследований проведена в очищенных жидкостях с малым содержанием примесей, а, следовательно, с малым уровнем низковольтной проводимости.

Омический низковольтный участок на безразмерной ВАХ соответствует участку $I = 1$, эти участки у всех кривых на приведенной ВАХ совпадают. Высоковольтные участки на приведенных ВАХ хорошо аппроксимируются линейным зависимостям приведенного тока I от напряжения. Это значит, что на обычной ВАХ высоковольтный участок описывается квадратичным полиномом. Коэффициент $K=I/U$ характеризует безразмерную высоковольтную проводимость, а, следовательно, степень отклонения от закона Ома. Из рис. 2.13 видно, что в чистом изоктане, обладающем наиболее низкой собственной проводимостью, отклонения от линей-

В первой серии экспериментов исследовалось влияние материала электрода на ВАХ в закрытой кювете с электродами провод над плоскостью. В различных экспериментах использовались проволоочки, изготовленные из различных материалов. Опорный электрод – медная пластина оставался неизменным. Диаметр проволоочного электрода в различных экспериментах оставался постоянным, равным 1 мм, чтобы исключить влияние геометрии электродов.

Поверхности электродов перед экспериментами тщательно очищались соляной кислотой, и непосредственно после очистки выдерживались в сосуде с исследуемой диэлектрической жидкостью для исключения возможного окисления электрода при контакте с атмосферным кислородом. Первая группа исследований ВАХ для электродов провод над плоскостью проведена для изооктана очищенного.

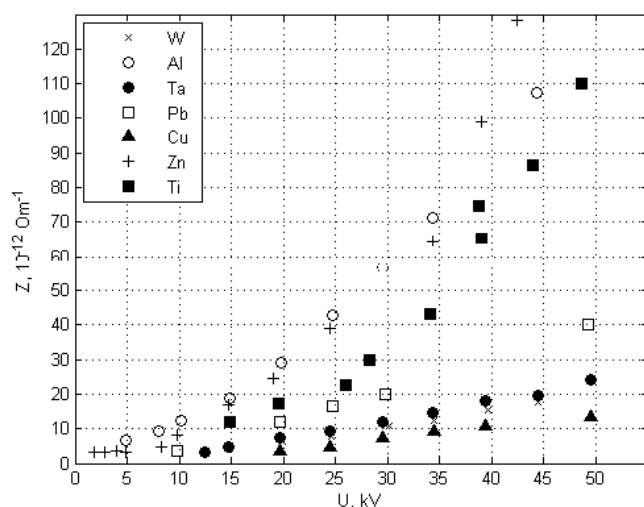


Рис.2.14. Приведенные ВАХ изооктана с электродами из различных материалов.

Следовательно, при изменении материала электрода может изменяться только концентрация ионов в жидкости. Это свидетельствует о том, что проводимость жидкости изменяется только при подключении источника напряжения, а ионы не изначально присутствуют в жидкости, а образуются при подключении напряжения, причем источником ионообразования, является приэлектродная реакция (инжекция) у катода.

С уменьшением работы выхода электрона растет интенсивность ионообразования, а, следовательно, и концентрация инжектированных ионов, определяющих высоковольтную проводимость жидкости. Таким образом, проводимость не является априорной характеристикой среды, а характеризует систему-электроды-жидкость и растет с ростом напряжения. Причины этого явления будут даны в главах 3-5. Как видно из рис. 2.14 все высоковольтные части зависимостей проводимости от напряжения аппроксимируются группой прямых, угол наклона которых к оси x , характеризующий интенсивность инжекции, зависит от материала катода. Степень отклонения от низковольтной проводимости при фиксированном напряжении различна для различных материалов очень высока и достигает двух порядков в области высоких напряжений, для электродов из алюминия, титана и вольфрама. Это свидетельствует о том, что в высоковольтной области ВАХ ионы рождаются в приэлектродных реакциях у отрицательного электрода, т.е. инжектируют в жидкость.

На рис. 2.14 представлены ВАХ в приведенном размерном виде: т.е. зависимости проводимости Z ячейки от напряжения. Как видно из приведенных результатов и таблицы, наблюдается тенденция роста высоковольтной проводимости с уменьшением работы выхода электрона. Как известно величина высоковольтной проводимости определяется концентрацией ионов и величиной их подвижности. Подвижность ионов в соответствии с законом Вальдена-Стокса определяется вязкостью жидкости и не может зависеть от свойств жидкости, контакти-

Угол наклона высоковольтных участков приведенной ВАХ характеризует коэффициент высоковольтной проводимости и существенно зависит от материала электрода и также увеличивается по мере снижения работы выхода электрона с поверхности металла. Наиболее низкие значения работы выхода наблюдаются у химически активных металлов щелочноземельной группы, окисляющихся на воздухе. Исследования показали, что химически очищенные алюминий и магний, очень быстро стареют в таких жидких диэлектриках, как изооктан и трансформаторное масло. Причины старения будут обсуждаться далее.

Влияние степени неоднородности электрического поля на ВАХ в растворах йода в трансформаторном масле [2.5].

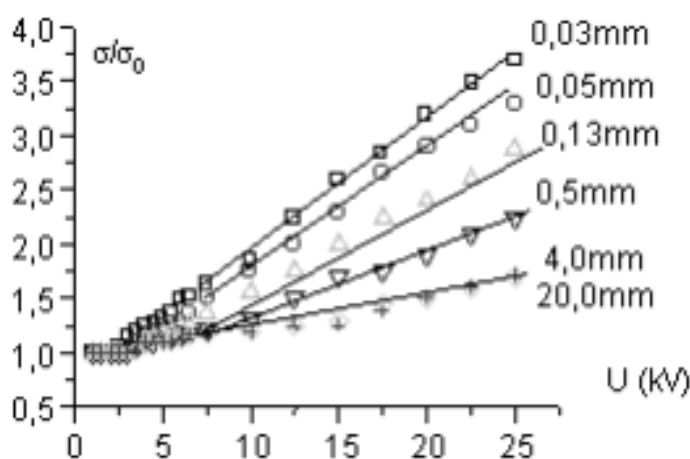


Рис. 2.15. Приведенные ВАХ в полях различной степени неоднородности.

Как уже отмечалось ранее одним из механизмов образования заряда в жидких диэлектриках является эффект Вина. Этот эффект зависит от локальной напряженности поля и не проявляется в однородных и квазиоднородных полях и может стать существенным в полях высокой степени неоднородности. Однако в растворах с электронно-акцепторной примесью, в качестве которой выступает йод, ситуация иная. В них определяющим механизмом зарядообразования является инжекция. Поэтому для изучения

влияния степени неоднородности поля на характер ВАХ были проведены исследования для системы электродов провод (отрицательный) над пластиной размерами $4,5 \times 1 \text{ см}^2$. В экспериментах использовались медные цилиндрические провода диаметром **0,05; 0,5; 1; 3 и 4 мм**, латунный цилиндрический стержень диаметром **20 мм**, платиновая нить диаметром $3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ и режущая часть лезвия бритвы (сталь) толщиной **0,08 мм**. В качестве рабочей жидкости использовался раствор йода в трансформаторном масле с концентрацией йода 10^{-4} г/см^3 . Это жидкость с примесью, обладающей выраженными электронно-акцепторными свойствами и показывающая высокую степень отклонения от закона Ома. Низковольтная проводимость рабочей жидкости 20 пСим/м . Широкий набор электродов позволил изменять приэлектродную напряженность электрического поля и плотность тока низковольтной проводимости в пределах трех–четырех порядков. Например, при напряжении **10 кВ** напряженность электрического поля у поверхности цилиндрического электрода, рассчитанная в электростатическом приближении, с изменением его диаметра от **2 см** до $3 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ изменялась от $1,7 \cdot 10^4$ до 10^7 В/см ; у поверхности цилиндра диаметром 2 см она всего лишь в 2,5 раза больше, чем в системе плоскопараллельных электродов. Таким образом, охватываются ЭГД–течения в диапазоне от сильно неоднородных полей до близких к однородному. В качестве цилиндрического электрода использовались поочередно все перечисленные электроды, продольная ось цилиндров устанавливалась параллельно нижнему электроду. Во всех экспериментах этой серии верхний электрод отрица-

телен, межэлектродное расстояние составляло 1,5 см, Верхний предел диапазона напряжений в котором исследованы ВАХ примерно совпадает с пробивным напряжением.

Таким образом, анализ результатов эксперимента по изучению ВАХ в полях различной степени неоднородности показывает, что пробивное напряжение практически не изменяется в полях различной степени неоднородности. Качественных изменений характера ВАХ не происходит с изменением степени неоднородности электрического поля. Длина высоковольтного участка по шкале напряжений слабо изменяется с ростом степени неоднородности поля. С увеличением степени неоднородности поля несколько увеличивается наклон высоковольтного участка ВАХ, причем зависимость угла наклона от степени неоднородности поля слабая, а именно логарифмическая. Это существенное отличие от газовых законов, где в соответствии с кривыми Пика разрыв между напряжением, соответствующим началу лавинных процессов и напряжением лидерного пробоя существенно зависит от степени неоднородности поля. Выявленное качество ВАХ позволяет считать, что вклад эффекта Вина жидкостях с невысоким уровнем низковольтной проводимости, даже в сильно неоднородных полях невелик и нельзя утверждать, что в сильно неоднородном поле изменяется механизм высоковольтной проводимости с инжекционного на диссоционный (обусловленный эффектом Вина).

В тоже время введение примесей, обладающих электронно-акцепторными свойствами и изменяющих свойства границы раздела электрод– жидкость существенно влияет как на величину низковольтной проводимости, так и на характер высоковольтного участка ВАХ, а именно на степень отклонения от линейности высоковольтного участка ВАХ. При этом схожие результаты получены в жидкостях различных по составу. Как уже отмечалось степень диссоциации примесей ничтожна, примесь присутствует в исходной жидкости в основном в молекулярном виде. Таким образом в высоковольтной области в диэлектрической жидкости находится по крайней мере три, а может и четыре типа ионов: два типа ионов, образующиеся за счет самодиссоциации примесных молекул: $C = A^+ + B^-$ и один, или два типа ионов, образующихся в приэлектродных реакциях путем перехода электрона с поверхности электрода на молекулу примеси: $C + e = C^-$, обладающую повышенными электронно-акцепторными свойствами или за счет отдачи электрона молекулой обладающей повышенными электронно-донорными свойствами: $C - e = C^+$.

Введение в жидкость примесей, обладающих повышенными электронно-акцепторными свойствами, существенно увеличивает величину тока низковольтного и высоковольтного участка ВАХ. Наблюдается выраженный полярный эффект. Это свидетельствует о том, что, начиная с некоторого порогового напряжения ионы в жидких диэлектриках, рождаются в приэлектродных реакциях на поверхности одного или обоих электродов, т.е. определяющим механизмом высоковольтной проводимости является инжекция. В неоднородном поле рождение происходит преимущественно на поверхности электрода с малым радиусом кривизны, т.е. проволочки.

ДВАХ в симметричной системе электродов.

Следующая серия экспериментов по изучению влияния свойств границы электрод– жидкость, а именно материала одного из электродов в симметричной системе из двух проводов диаметром **0,3 мм** и длиной **29 мм**, при межэлектродном расстоянии **0,4 см**. Электроды размещались в закрытой кювете из плексигласа размерами: 10х50х100мм. В качестве диэлектрической жидкости использовалось очищенное трансформаторное масло про-

водимостью $10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Материалами электродов служили: **Mg, Al, Ta, Ti, Cu, Au, Pb, W, Mo, W-Re(10), Nb, Id, Ni**. Диапазон изменения напряжения составил $0 \div 30 \text{ кВ}$. В этой серии экспериментов ДВАХ записывались на двух координатный самописец, поэтому их обработка по методике, изложенной выше не производилась, т.е. на графиках приведены зависимости полного тока, равного сумме токов проводимости и емкостного тока. На рис.2.16 представлены динамические вольтамперные характеристики $I(U)$ при двух скоростях роста-спада напряжения: медленная $-0,61 \text{ кВ/сек}$ и быстрая -6 кВ/сек для различных пар электродов.

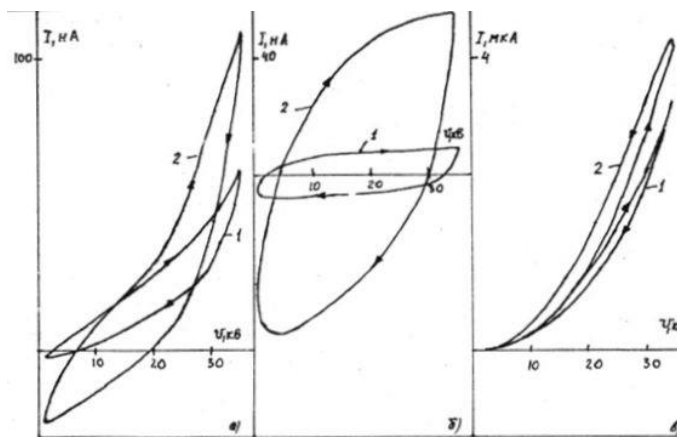


Рис.2.16. Динамические вольтамперные характеристики для электродов провод-провод в очищенном трансформаторном масле. Пары анод-катод из материалов: а) $\text{W}^- - \text{Ta}^+$, б) $\text{Au} - \text{Au}$; в) $\text{W}^- - \text{Ti}^+$

Следует отметить, что симметричная система электродов является особой системой, характеризующейся протеканием инжекции на обоих электродах, при этом в жидкости присутствует четыре иона. Эта система подробно будет исследована далее в главе 5. На рис. 2.16. и далее приведены результаты исследования. Видно, что для различных пар электродов зарегистрированы различные уровни токов.

Наименьший уровень толов наблюдается для пары золото-золото (рис.2.16 б). По виду ДВАХ можно утверждать, что токи инжекции в этой системе

очень малы, а вид ДВАХ определяется преимущественно емкостным током. Действительно при емкости системы в 10 пФ, при скорости 600 в/с уровень емкостного тока порядка 1 нА, а при скорости 6000В/с порядка 10 нА.

- Для пары вид $\text{W}^- - \text{Ti}^+$, уровень токов в два раза выше, а вид ДВАХ также изменился. Для этой пары ток инжекции гораздо выше и влияет на характер ДВАХ.
- Для пары $\text{W}^- - \text{Ti}^+$ уровень токов возрос более чем на порядок, а гистерезис практически исчез.
- Для различных пар металлических электродов зарегистрированы три вида петли гистерезиса: - направление обхода по часовой стрелке (ниспадающая ветвь лежит ниже возрастающей), - направление обхода против часовой стрелки (ниспадающая ветвь петли лежит выше возрастающей), - на гистерезисной кривой наблюдается изменение направления обхода (гистерезисная кривая имеет форму восьмерки).
- Анализ гистерезисных кривых исследованных пар металлических электродов показал, что максимальные значения тока наблюдаются в паре $\text{W}^- - \text{Ti}^+$. Направление обхода против часовой стрелки. Для пары $\text{W}^- - \text{Ta}^+$ картина иная. Петля гистерезиса значительно уже, меньше предельные значения токов и скорости.
- Для электродов $\text{Ni}^+ - \text{W}^-$, гистерезисная кривая имеет форму восьмерки.
- Для пары $\text{W}^- - \text{Mg}^+$ ситуация более стабильна, гистерезис кривых выражен слабо.
- Пара $\text{W}^- - \text{Pb}^+$ показала стабильное течение от катода к аноду. Скорости течения велики, направление обхода кривой гистерезиса скорости по часовой стрелке.
- Как показало сопоставление имеющихся данных с результатами исследования однозначной связи характера гистерезисных кривых с разницей работ выхода не об-

наружено, эта связь носит более сложный характер. Таким образом, поведение пар электродов оказывается непредсказуемым, если использовать для ее оценки только одну величину: разность работ выхода электрона.

Далее приведены результаты исследования ДВАХ в изооктане в симметричной системе электродов провод-провод. Исследования показали, что анод и катод, изготовленные из различных материалов, могут дать значительный уровень высоковольтного тока инжекции при рациональном выборе пар.

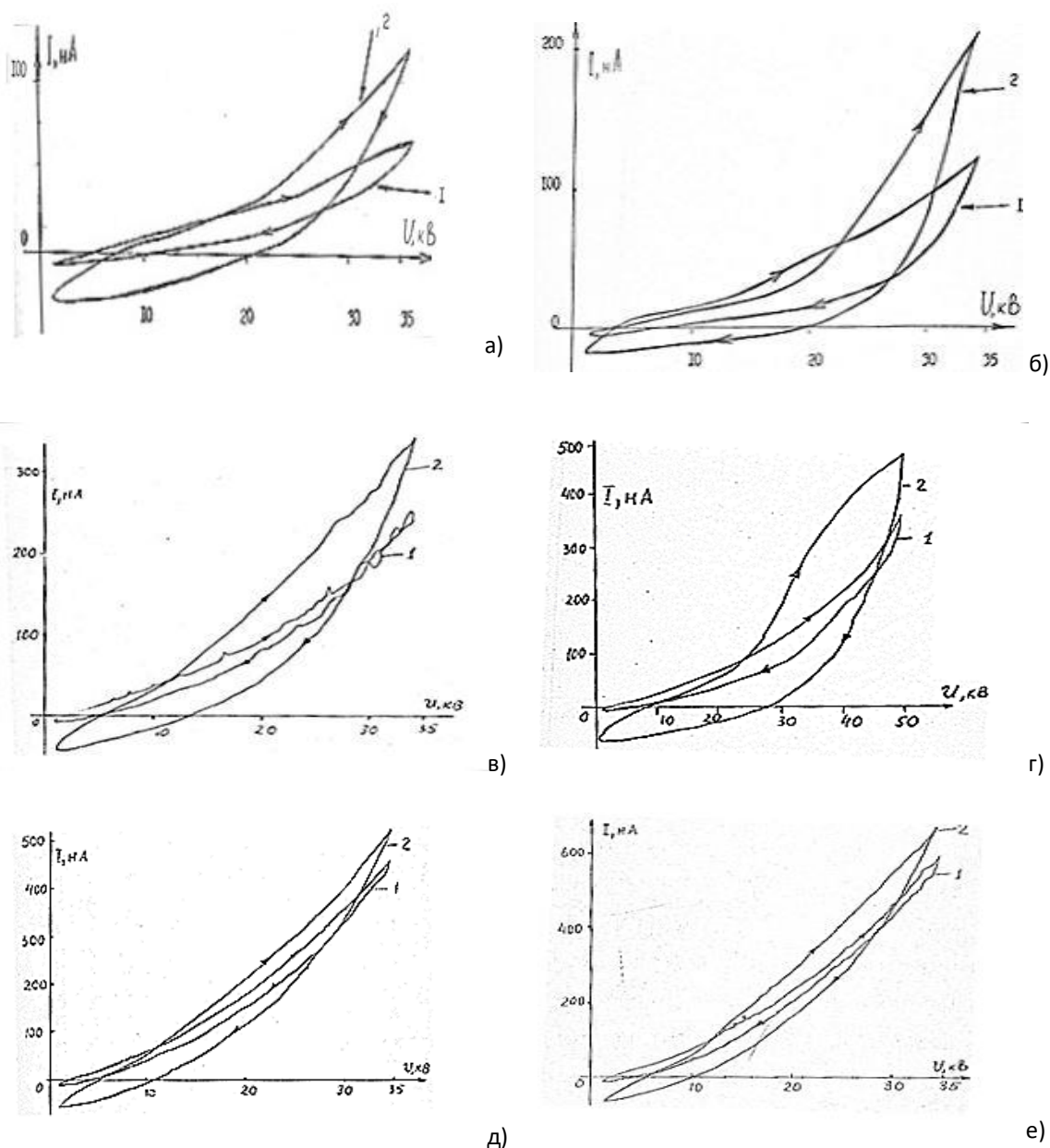


Рис. 2.17. Вольтамперные характеристики для систем электродов: а – Au–Au, б – Au–Al (неочищенный), в – Au–Al, г – Au–Mg, е – Au–Ta, ж – Au–Ti. 1 – быстрое изменение напряжения – 6 кВ/сек, 2 – медленное – 0,6 кВ/сек.

Как видно на представленных на рис. 2.17 графиках, характер динамических вольтамперных характеристик, существенно зависит от материала положительного электрода, при отрицательном электроде, изготовленном из золота. Динамические вольтамперные характеристики имеют выраженный гистерезис – величина тока соответствующего росту напряжения значительно выше, чем при его спаде, проявляющийся более ярко при высоких скоростях роста и спада напряжения. Гистерезис тока для анода из алюминия, титана

и тантала практически вырождался при малых скоростях роста и спада напряжения, ход динамических вольтамперных характеристик имеет наиболее плавный характер и наименьшие отклонения от линейной зависимости.

Максимальные значения токов у этой группы катодов существенно выше, чем у катодов второй группы (Au, W20, Al(Al₂O₃)). Для этих электродов наблюдался также наиболее сильный гистерезис и низкие значения токов. Магний имеет наиболее низкую работу выхода, а золото наиболее высокую. Однако однозначной связи величины токов и характера ВАХ с величиной работы выхода не зарегистрировано.

Как уже отмечалось ранее, электроды, электролитически очищенные в растворе NaOH, с течением времени значительно старели. Особенно быстро старели электроды из магния и алюминия. Не подвергались заметному старению только электроды из золота и вольфрама.

Таким образом изменение материала электродов в геометрически идентичной системе, типа провод – провод значительно влияет как на характер ДВАХ, так и на уровень тока. На низковольтном участке ДВАХ для пар Au–Ti, Au–Ta, ток существенно выше, чем для пар Au – Au, Au–Al. Эта же тенденция сохраняется и для высоковольтных участков. Таким образом низковольтная, а также высоковольтная проводимость чистой жидкости (изооктана) зависит от материала электродов.

ДВАХ для несимметричных электродов типа игла-конфузор [2.14, 2.15].

Наряду с симметричной системой электродов типа провод-провод был проведен цикл исследований по изучению влияния материала электродов на ДВАХ в сложной системе электродов типа «игла-конфузор» с неоднородным полем, при отрицательной игле и очень малом межэлектродном расстоянии $l_0 = 1,4$ мм.

Поэтому средние напряженности поля в такой системе были на порядок выше, чем в предыдущих экспериментах. При положительной игле пробивное напряжение было почти на порядок меньше. Столь высокая пробивная прочность достигалась тщательной многократной фильтрацией исследуемой жидкости перед проведением экспериментов через тонкий фторопластовый фильтр с диаметром пор в 1 мкм. Игольчатые электроды были изготовлены из различных материалов, с различными эмиссионными свойствами, в частности с различной энергией выхода электрона с поверхности металла в вакуум (табл.2.4). Электроды располагались в сосуде большого объема, причем на выходе из конфузора установлен микроанометр, позволяющий измерять избыточное давление, возникающее в системе при подаче напряжения.

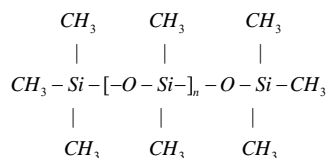
Таблица 2.4.

Материал электрода	Ti	Nb	Ta	Al	Mo	Fe	Cu	Ni	W	Pd
Энергия выхода электрона в вакуум, эВ	3,95	3,99	4,12	4,25	4,3	4,31	4,4	4,5	4,54	4,8

Для противоэлектрода – конфузора использовались материалы Ti, Zn, Al, Fe, Cu, Cr. Чтобы избежать образования окисных пленок и загрязнений, электроды перед экспериментом очищались электрохимическим способом и хранились в изолированных от воздуха ёмкостях. Исследования проводились попарно – с каждым "коническим" противоэлектродом, выполненным из каждого упомянутого материала, испытывалась каждая из упомянутых игл. Измерительная установка включала наноамперметр для измерения тока,

сигнал с которого подавался на самописец и микроманометр, соединенный с отверстием конфузора. Последний позволял записывать избыточное давление, развиваемое данной системой электродов и записывать зависимость давления от напряжения.

В качестве рабочей среды использовалась кремний органическая жидкость ПМС-1,5 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,4$ и удельной электропроводностью $\sigma_0 = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, представляющая собой сложное кремнийорганическое вещество типа:



Это слабо полярная жидкость плотностью $\rho = 0,865 \text{ г/см}^3$. В качестве второй рабочей жидкости использовали изоктан $\sigma_0 = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $\epsilon = 1,6$, который подвергался такой же процедуре фильтрации. Исследования проводились также в трансформаторном и вазелиновом маслах.

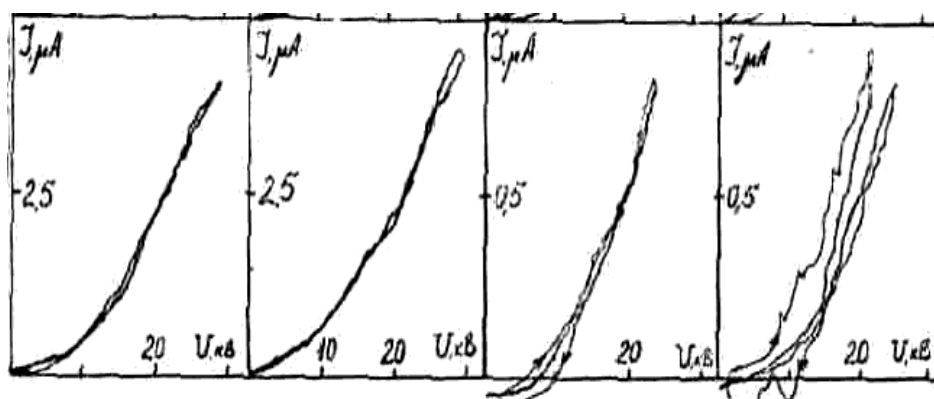


Рис. 2.18. Динамические ВАХ для электродов $\text{Mo}^- - \text{Ni}^+$ в различных жидкостях: ПМС, бензин, трансформаторное масло, вазелиновое масло.

На рис.2.18 представлены динамические ВАХ для электродов $\text{Mo}^- - \text{Ni}^+$ в различных жидкостях. Все данные приведены для отрицательной иглы и положительного конфузора в диапазоне напряжений 0-30кВ. Изменение полярности электродов существенно (более чем на порядок) снижало пробивную прочность системы. Поэтому исследование ДВАХ в прежнем диапазоне напряжений оказалось невозможным.

Динамические характеристики записаны при быстрой (5 кВ/сек) и медленной ($0,5 \text{ кВ/сек}$) скоростях изменения напряжения. Стрелками обозначены направления изменения напряжения (рост и спад). ДВАХ в слабвязких жидкостях не имеют гистерезиса и имеют типовой вид: линейный участок в области низких напряжений (до 5 кВ) и нелинейный в области высоких. Уровень токов достаточно высок: порядка 5 мкА при напряжении 25 кВ. В более вязких жидкостях (трансформаторное и вазелиновое масла) уровень токов на порядок ниже, на ДВАХ наблюдается гистерезис, особенно хорошо выраженный при высоких скоростях изменения напряжения.

Вольтамперные характеристики (рис.2.18, нижний ряд) $J(U)$ порога не имеют. Общая площадь петли гистерезиса зависимости $J(U)$ несколько ниже, чем для зависимостей $P(U)$. Сопоставление зависимостей, полученных в различных жидкостях выявляет их су-

ущественные различия, касающиеся как характера кривых $P(U)$ и $J(U)$, так и величины гистерезиса, а также величин давления и токов. Последние существенно ниже в более вязких жидкостях, таких как трансформаторное и вазелиновое масла.

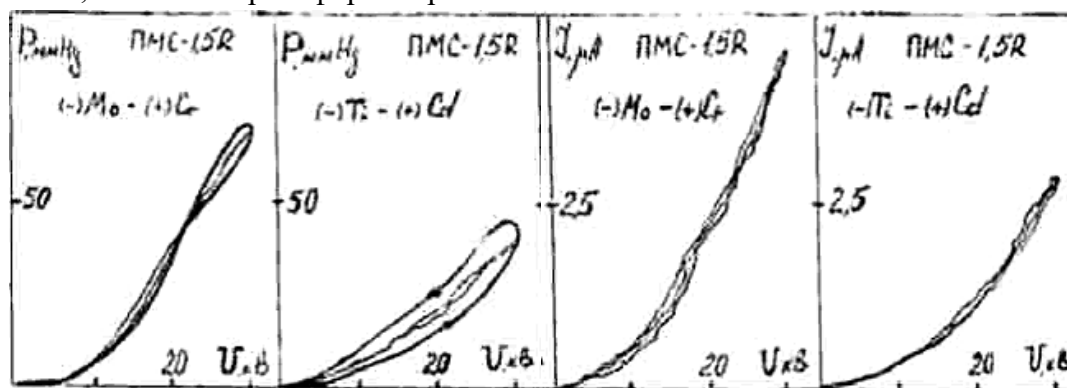


Рис. 2.19. Динамические характеристики $P(U)$ (слева) и $J(U)$ (справа) системы электродов «игла-конфузор» в ПМС-1,5R для пар электродов $\text{Mo}^- - \text{Cr}^+$ (слева) и $\text{Ti}^- - \text{Cd}^+$ (справа).

Большая серия исследований проведена для систем электродов одинаковой геометрии, идентичной рис.2.34, в которой анод и катод изготовлены из различных материалов. В каждой жидкости исследовано 60 различных металлических пар. Исследования выявили значительное влияние материала обоих электродов на динамические характеристики системы и на пробивную прочность, которая изменялась более чем в два раза.

На рис.2.34 в качестве примера представлены динамические характеристики системы электродов «игла-конфузор» в ПМС-1,5R для различных пар электродов. Этот пример наглядно демонстрирует количественные и качественные различия интегральных характеристик системы «электроды-жидкий диэлектрик» при изменении свойств межфазной границы, а именно материала электродов, при одинаковых прочих параметрах системы. Влияние поверхностных эффектов распространяется также и на гистерезисные свойства динамических ВАХ.

Таким образом, эти серии экспериментов, поставленные в сильно неоднородных полях повышенной напряженности, в жидкости очищенной от примесей, свидетельствуют об определяющей роли в поверхностного ионообразования (инжекции) в высоковольтной области ВАХ, причем заметную роль играет материал не только игольчатого электрода, но и противоиэлектрода.

Исследование процессов старения активированных электродов

Старение активированных электродов, в изоктане, находящемся в контакте с атмосферным воздухом.

Ранее было показано, что электроды из электрохимически очищенных металлов с малой работой выхода электрона показывали значительное усиление тока, протекающего через жидкость. Однако со временем этот эффект пропадал, электроды старели. Старение электрода может происходить за счет покрытия его поверхности окисной пленкой в результате взаимодействия металла с растворенным в жидкости кислородом, либо за счет взаимодействия металла с примесными добавками. Для разделения этих процессов следует дегазировать жидкость, а затем вместо атмосферного воздуха растворить в жидкости инертный газ.

Исследования динамических вольтамперных характеристик проводились в специальной герметизированной кювете, позволяющей вакуумировать пространство над исследу-

дуемым объемом жидкости, а также заполнить его инертным газом. В качестве жидкости использован изоктан, проводимостью $\sigma_0 = 10^{-12} \text{Ом}^{-1} \text{м}^{-1}$ и очищенное трансформаторное масло ($\sigma_0 = 10^{-12} \text{Ом}^{-1} \text{м}^{-1}$).

Изучение процессов старения активных электродов проводилось путем автоматической регистрации динамических вольтамперных характеристик, либо записи зависимостей тока через жидкость от времени в различных условиях:

- при заполнении свободного пространства кюветы атмосферным воздухом;
- при вакуумировании свободного пространства над поверхностью жидкости;
- при заполнении свободного пространства инертным газом - аргоном или фреоном.

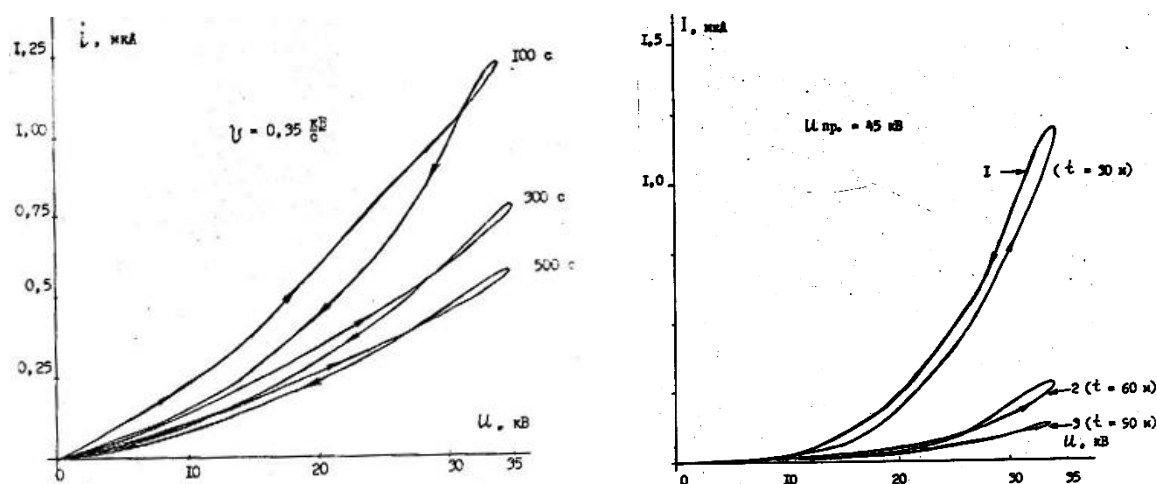


Рис. 2.20. Старение системы Al-Au в изоктане с воздухом (слева) и с фреоном (справа)

На рис.2.20, слева, представлены динамические вольтамперные характеристики системы активированных $\text{Al}^+ - \text{Au}^-$ полученные сразу после очистки алюминиевого электрода. Открытая поверхность жидкости контактирует с атмосферным воздухом. Записано несколько периодов подъем-спад напряжения. Запись демонстрирует весьма высокие токи от свежечистого алюминиевого анода и достаточно быстрый спад тока со временем, характеризующий старение электрода в процессе эксперимента. Время, соответствующее максимуму напряжения в конце каждого периода, указано на графике. Видно, что старение электрода за первые 200сек эксперимента весьма существенно: максимальное значение тока уменьшается почти в два раза, за последующие 200 сек ток продолжает уменьшаться.

Замещение воздуха на фреон не останавливает старение электрода.

Выводы:

1. Исследованы ВАХ множества жидких диэлектриков различной природы и степени очистки, а также очищенных жидкостей со специальными примесями. Исследование показало, что ВАХ независимо от геометрии электродов имеют два участка: омический на котором ток пропорционален напряжению и высоковольтный, на котором зависимость тока от напряжения не линейна. Линейный участок наблюдается в диапазоне «низких» напряжений, нелинейный в области «высоких» напряжений.

- Высоковольтный участок ВАХ описывается, как правило, квадратичной, либо кубической функцией напряжения.
2. Жидкие диэлектрики имеют собственную низковольтную «проводимость», как правило, образованную диссоциацией примесных молекул. Случайные примеси, формирующие ионный состав технической диэлектрической жидкости, могут содержаться в ничтожных дозах и не всегда идентифицируются.
 3. Низковольтная «проводимость» жидкости, измеренная в стандартной ячейке при напряжении порядка 100 В, зависит от степени очистки и концентрации примесей, а также от наличия в жидкости твердых включений.
 4. Низковольтную «проводимость» следует измерять в тщательно отфильтрованной жидкости. Степень отклонения от линейности высоковольтного участка ВАХ, наиболее высока в хорошо очищенных жидкостях с уровнем низковольтной проводимости порядка 0,01-1 пСм/м. С ростом «проводимости» жидкости за счет растворения в ней примесей приводит к уменьшению степени отклонения от линейности. Собственная беспримесная проводимость хорошо очищенных жидких диэлектриков может быть снижена до уровня в 10^{-17} см/м. Известные примеси могут существенно, на 4-9 порядков повышать низковольтную проводимость жидких диэлектриков.
 5. Степень отклонения от линейности на высоковольтном участке существенно зависит от контактных свойств границы электрод-жидкость и определяется примесным составом и материалом поверхности ионообразующего электрода, что свидетельствует о преобладающей роли поверхностного ионообразования в приэлектродных реакциях. Основным механизмом высоковольтного зарядообразования в жидкостях с уровнем низковольтной проводимости до 0,1 нСм/м является инжекция, т.е. образование ионов в приэлектродных реакциях.
 6. Инжекционный механизм реализуется как в сильно неоднородных полях, так и в слабо неоднородных полях. Инжекционный механизм высоковольтной проводимости существенно зависит от концентрации вводимых примесей. Зависимость инжекционного тока от концентрации примесей имеет участок насыщения.
 7. Среди примесей, существенно влияющих на уровень инжекции, а, следовательно, на высоковольтную проводимость следует назвать: йод, бутанол, альфа лейцин.
 8. Ток инжекции существенно зависит от материала электродов. В системах электродов с сильно неоднородным полем типа провод (лезвие) над плоскостью материал электрода с малым радиусом кривизны влияет на инжекционный ток.
 9. На участке высоковольтной области ДВАХ в диэлектрической жидкости присутствует по крайней мере три, а может и четыре типа ионов: два типа ионов, образующиеся за счет самодиссоциации примесных молекул и один, или два типа ионов, образующихся в приэлектродных реакциях путем перехода электрона с поверхности электрода на молекулу примеси, обладающую повышенными электронно-акцепторными свойствами или за счет отдачи электрона молекулой, обладающей повышенными электронно-донорными свойствами.
 10. В симметричных системах электродов типа провод-провод материалы обеих электродов существенно влияют на ток как на линейном, так и на нелинейном участках ДВАХ.
 11. Очистка поверхности электродов от оксидных пленок приводит к активации процессов инжекции. Очищенные электроды со временем стареют, т.е. процессы ин-

жекции с таких электродов затухают со временем. Возможна консервация активированных электродов путем нанесения тонких лаковых покрытий.

ДВАХ, обусловленные эффектом Вина [2.16-2.20].

В отличие от инжекционного механизма, эффект Вина является функцией модуля напряженности поля и поэтому в несимметричных системах типа провод над плоскостью не зависит от полярности и материала электрода с малым радиусом кривизны. Проблема разделения двух механизмов зарядообразования, состоит в том, что они оба локализованы в области максимальной напряженности электрического поля, т.е., как правило, у поверхности заостренных электродов. Однако существует принципиальная возможность создания области усиления интенсивности диссоциации вдали от поверхности электродов. Это возможно, если в межэлектродный промежуток (МЭП) поместить вставки из твердой изоляции, разделяющий пространство между плоскими электродами на две части, на поверхности которых будет накапливаться заряд, тем самым приводя к изменению силовых линий электрического поля. В результате подобного процесса, возникает ситуация, когда максимальная напряженность будет достигаться не на поверхности электродов, а внутри межэлектродного промежутка, вблизи отверстия в твердой изоляции. Подобный случай уникален тем, что в этой области повышенной напряженности электрического поля исключено возникновение инжекции (из-за отсутствия электродов), но, в то же время, возможно проявление эффекта усиления интенсивности диссоциации под действием электрического поля. Под действием электрического поля, согласно теории Онзагера, происходит усиление интенсивности диссоциации в F раз ($F(p) = I_1(4p) / 2p, p = e^2 / (2k_B T) \sqrt{[E / (4p \epsilon \epsilon_0 e)]}$). Т.е. эффект Вина не зависит от низковольтной проводимости среды. Тем не менее выбор низковольтной проводимости исследуемой жидкости для эксперимента определяется следующими соображениями. Степень отклонения от линейности высоковольтного участка ВАХ инжекционного типа снижается с увеличением проводимости (см. рис.2.13). Поэтому единственной причиной увеличения степени отклонения от линейности в жидкостях повышенной проводимости является эффект Вина.

Измерения ВАХ проведены в кювете, конструкция которой изображена на рис.2.21 Макет по соображениям технического характера состоит из трёх частей: внешней кюветы с высоковольтным электродом, внутренней кюветы с барьером и вставного заземлённого электрода.

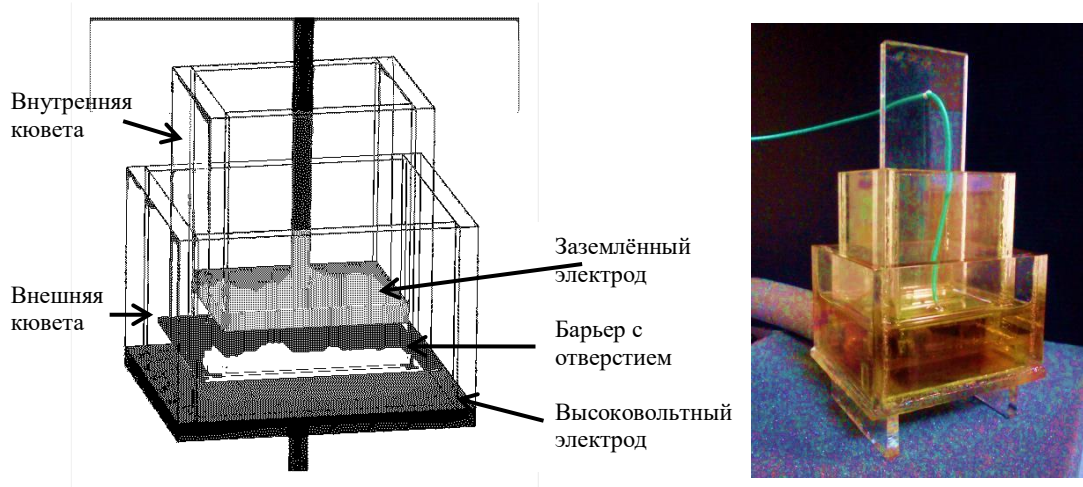


Рис.2.21 Схема и фотография экспериментальной кюветы

В качестве рабочей жидкости использовались смеси трансформаторного масла с циклогексанолом, где последний использовался для повышения низковольтной проводимости с 10^{-11} См/м у чистого масла до значений порядка 10^{-8} См/м. Добавление 15% и 23% циклогексанола привело к увеличению низковольтной проводимости жидкостей до значений $1.1 \cdot 10^{-9}$ См/м и $1.08 \cdot 10^{-8}$ См/м соответственно. В эксперименте значение потенциала высоковольтного электрода измерялось через делитель напряжений при помощи АЦП, токовые характеристики измерялись пико амперметром Keithley 6485, сигнал с которого также регистрировался компьютером. Для каждого нового выставленного значения напряжения происходила запись амперсекундной характеристики с целью удостовериться в стационарности значения тока. Когда его значение становилось стационарным, точная величина тока определялась как среднее значение сигнала за 10 секунд.

Однако с увеличением проводимости жидкости время установления стационарного значения тока пропорционально уменьшается, поэтому при проводимости жидкости 10^{-8} См/м уже после нескольких секунд все изменения тока за счет накопления поверхностного заряда, прекращаются.

Рассмотрим установившиеся вольтамперные характеристики. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.22.

ВАХ рис.2.22. имеют типовой вид: при низких напряжениях имеется линейный участок ВАХ, который продлен пунктиром до напряжения 30 кВ. Фактически, таким был бы ток в системе, если бы эффект Вина в отверстии не проявлялся, и выполнялся бы закон Ома. Начиная с 2-5 кВ на ВАХ наблюдается отклонение от линейности, т.е. появляется высоковольтный участок ВАХ. Степень отклонения от линейности высока и достигает 3-4 при напряжении в 30 КВ, не зависимо от низковольтной проводимости жидкости. Это значит, что эффект Вина приводит к увеличению высоковольтной проводимости жидкости в 3-4 раза при максимальном напряжении (соответствует напряжённости поля 10^7 В/м в отверстии). Высоковольтная проводимость (концентрация ионов) увеличивается только под воздействием высокой напряженности поля в области отверстия и быстро спадает под действием рекомбинации при снятии напряжения. Эффект Вина проявляется только в области повышенной напряженности поля, в остальных частях кюветы напряженность поля значительно ниже.

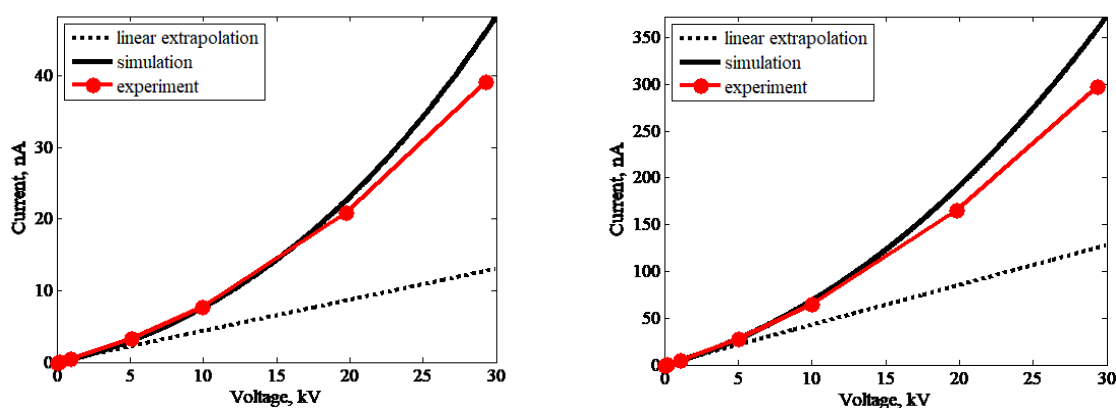


Рис. 2.22 Вольтамперные характеристики в смеси трансформаторного масла ГК-1700 и циклогексанола (слева – 15%, справа – 23%). Сравнение результатов эксперимента (увеличение и уменьшение напряжения). Пунктиром обозначена линейная экстраполяция начального линейного участка ВАХ.

Однако, как будет показано в главе 4 и 5, возникающие в кювете ЭГД-течения разносят жидкость повышенной проводимости по всему объему. Этот эксперимент безусловно доказывает существование эффекта Вина и его определяющую роль в высоковольтной проводимости жидкостей повышенной проводимости. Роль инъекции в таких условиях практически отсутствует, т.к. напряженность поля у поверхности электродов значительно ниже чем в отверстии, а также за счет рекомбинации малого инжектируемого заряда в приэлектродных слоях (см. главу3). Поэтому инъекция практически не влияет на отклонение от линейности высоковольтного участка ВАХ (см. рис.2.13).

Роль эффекта Вина и его влияние на высоковольтный участок ВАХ в обычных системах электродов наиболее значительна в сильно неоднородных электрических полях. Поэтому, для проведения исследования ДВАХ обусловленных эффектом Вина в обычной кювете была выбрана система электродов лезвие-плоскость, поскольку она обладает высокой степенью неоднородности распределения электрического поля. Исследование проводилось в тех же рабочих жидкостях, что и в первом эксперименте. Исследование ДВАХ

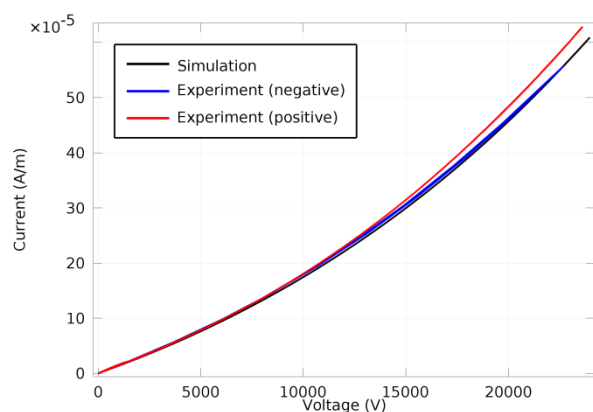


Рис. 2.23. Динамические вольтамперные характеристики системы лезвие-плоскость при отрицательном и положительном лезвиях.

проведено при обеих полярностях лезвия. Как было показано в специальной кювете при повышенной низковольтной проводимости эффект Вина является доминирующим.

На рис. 2.23. приведены динамические вольтамперные характеристики системы лезвие-плоскость при отрицательной и положительной полярности лезвия в растворе циклогексанола в трансформаторном масле с проводимостью 10 н См/м. ДВАХ на имеют гистерезиса и практически совпадают до 10 кВ а далее отличаются очень слабо при различных полярностях. Степень отклонения от линейности при напряжении 25 кВ существенна - около двух. Эффект Вина проявляется в окрестности кончика лезвия. Именно в этой области под действием поля повышается концентрация диссоциированных ионов. Однако ЭГД-течения(см. главу 5) разносят повышенную концентрацию по всему объему жидкости и таким образом существенно повышают высоковольтную проводимость жидкости и влияют на ход высоковольтного участка ДВАХ.

Таким образом отсутствие полярного эффекта и гистерезиса ДВАХ позволяет утверждать, что в условиях сверхсильных полей в жидкостях повышенной проводимости доминирует эффект Вина, дающий высокую степень отклонения от линейности высоковольтного участка ДВАХ.

Выводы:

1. При помощи оригинальной установки с системой плоских электродов и твёрдым диэлектрическим барьером с отверстием впервые установлена роль эффекта Вина на высоковольтный участок ВАХ.
2. В жидкостях повышенной проводимости 10-100 н Сим/м получена нелинейная вольтамперная характеристика с высоким отклонением от линейности высоковольт-

- тного участка ВАХ, причём это отклонение обусловлено исключительно эффектом Вина.
3. Эффект Вина существенно влияет на высоковольтный участок ДВАХ в системах электродов с высокой степенью неоднородности поля (например, лезвие - игла над плоскостью) в жидкостях с повышенным уровнем низковольтной проводимости 10-100 н См/м. В этих жидкостях инжекционный механизм неэффективен, при этом степень отклонения от линейности полученных ДВАХ достигает 2.
 4. Влияние эффекта Вина на высоковольтный участок ДВАХ возможно также в хорошо очищенных от примесей жидкостях с уровнем низковольтной проводимости 0,01-1 пСм/м. Однако уровни токов инъекции в этих жидкостях на высоковольтном участке ДВАХ невелики – порядка десятков нА.

Литература к главе 2.

- 2.1 Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972. 296с.
- 2.2 Стишков Ю.К. Электрогидродинамическая модель проводимости изолирующих жидкостей: Автореф. канд. дис. Л., 1971. 12 с
- 2.3 Стишков Ю.К. Электрогидродинамическая модель проводимости изолирующих жидкостей // Электронная обработка материалов, 1973. №5с. 62-65.
- 2.4 Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. Физические основы электрогидродинамики. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 319с.
- 2.5 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 174 с.
- 2.6 Стишков Ю.К. Самусенко А.В. Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. Учебно-методическое пособие. НОЦ Электрофизика, СПбГУ, Санкт Петербург, 2012. С. 649.
- 2.7 Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Петрова М.Ю. Влияние свойств материала электрода на проводимость и кинематику ЭГД-течений в изооктане // Тез.докл. 4-й Всесоюз. конф. по магнитным жидкостям. Плес.1985.
- 2.8 Стишков Ю.К., Красильников С.Ю., Чирков В.А. Исследование электрогидродинамических течений в сверхсильных электрических полях Электронная обработка материалов, 2012, 48(4), 26–32.
- 2.9 Стишков Ю.К., Чирков В.А., Ситников А.А. Динамические вольтамперные характеристики слабопроводящих жидкостей в сильно неоднородных электрических полях // Сборник докладов X-ой Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2012. – С. 164-167
- 2.10 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Ампер-секундные характеристики переходного процесса установления ЭГД-течений при разных механизмах зарядообразования // Сборник докладов X-ой Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2012. – С. 82-85
- 2.11 Yu. K. Stishkov, V. A. Chirkov, A. A. Sitnikov Dynamic Current–Voltage Characteristics of Weakly Conducting Liquids in Highly Non-Uniform Electric Fields // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2014. – Vol. 50, – № 2. – P. 135-140
- 2.12 Грошев А.К., Михайлов С.А., Стишков Ю.К. Влияние свойств границы электрод-жидкость на высоковольтную проводимость жидких диэлектриков // Тезисы докладов III Межреспубликанского семинара, Гродно, 1992.

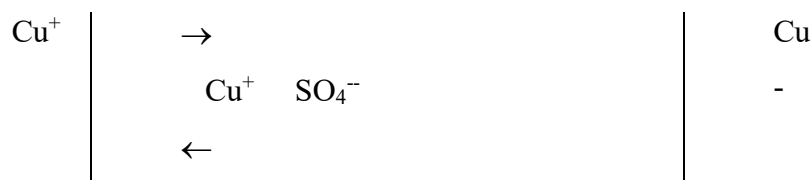
- 2.13 Стишков Ю.К. Ионизационно-рекомбинационный механизм зарядообразования // Докл. АН СССР. 1986. Т.288. №4, с. 861-865.
- 2.14 V. A. Chirkov, Yu. K. Stishkov, A. A. Sitnikov Integral electric current characteristics of unsteady-state processes of current passage through liquid dielectrics // Proceedings of 18th International Conference on Dielectric Liquids, ICDL 2014, Bled, Slovenia, 2014. – P. 1-5
- 2.15 Чирков В.А., Стишков Ю.К., Васильков С.А. Физические особенности измерения проводимости диэлектрических жидкостей // Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости. Труды III Всероссийской НТК "Техно-ЭМС 2016", 2016. – С. 101-104
- 2.16 S.A. Vasilkov, V.A. Chirkov, Yu.K. Stishkov Study on high-voltage conductivity provided solely by field-enhanced dissociation in liquid dielectrics // Journal of Electrostatics, 2017. – Vol. 88, – P. 81-87
- 2.17 V.A. Chirkov, S.A. Vasilkov, Yu. K. Stishkov The Role of Field-enhanced Dissociation in EHD Flow Formation at Various Levels of Low-voltage Conductivity // Proceedings of International Symposium on Electrohydrodynamics ISEHD 2017, 2017. – P. 1-5

ГЛАВА 3. ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В ЖИДКОСТЯХ С ИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ ПРОВОДИМОСТИ

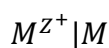
Объемный заряд и связанные с ним гидродинамические процессы являются основной особенностью жидких диэлектриков. Изложим основные причины появления объемного заряда. Как уже отмечалось в главе 1, в жидких диэлектриках, также, как и в водных электролитах, наблюдается ионный механизм электрической проводимости. Хорошо известно, что одним из постулатов электрохимии водных электролитов является постулат об электронейтральности. Считается также, что электрическое поле в электролит не проникает, а экранируется т.н. двойными приэлектродными слоями. В тоже время многочисленные эксперименты показали, что в жидких диэлектриках при прохождении хотя и малого, но конечного электрического поля появляется объемный заряд и именно благодаря этому заряду в них развиваются интенсивные электрогидродинамические течения. Вопрос о механизмах возникновения объемного заряда в жидкостях с ионным механизмом проводимости до настоящего времени остается предметом обсуждения на международных конференциях. Рассмотрим основные механизмы появления объемного заряда.

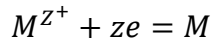
Электролитический (ионный) механизм проводимости хорошо изучен на примере водных электролитов, однако при изучении водных электролитов условие электронейтральности является постулатом. Впервые о возможности нарушения электронейтральности водных растворов солей заговорил Г. А. Остроумов. Рассмотрим, следуя работам [3.1-5], закономерности токопрохождения в растворах сильных электролитов, по возможности, не применяя условия электронейтральности. В этом случае удастся получить приближенное аналитическое решение задачи. Рассмотрим процессы на примере простейшей системы электродов первого рода: это электроды, изготовленные из металла, входящего в состав молекулы соли, растворенной в воде. Известно, что при растворении в воде солей, последние почти полностью распадаются на ионы под действием внутреннего поля, созданного молекулами растворителя – воды. В растворе каждый ион оказывается сольватированным и движется свободно.

Рассмотрим для определенности прохождение тока через раствор CuSO_4 с медными электродами [3.1].

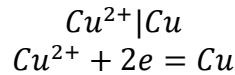


Здесь Cu – активный ион, поскольку он участвует в приэлектродных реакциях, а SO_4^{--} – пассивная форма, которая в приэлектродных реакциях участия не принимает. Электроды являются электродами первого рода, если приэлектродную реакцию на межфазной границе можно схематически представить в виде:



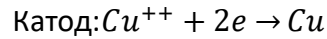
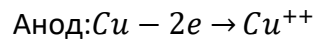


Для медного электрода в растворе сернокислой меди на катоде будет идти реакция электроосаждения:



а на аноде реакция электрорастворения. Эта схема представляет собой классический пример, т.н. «униполярной инъекции» в проводящую жидкость с четким определением реакций инъекции: на аноде образуются положительные ионы меди, на катоде они разряжаются. Ток переносится только в одном направлении – от анода к катоду.

Аналогичным образом протекают реакции электрохимического растворения (осаждения) любых металлов. Различия проявляются лишь в величине скачка потенциала на межфазной границе или перенапряжения (ϵ), при котором протекает реакция. Оно зависит, с одной стороны, от ионного состава раствора, а с другой – от материала электрода. Итак, приэлектродные реакции запишем в виде:



Для ионов меди, обозначим их значком (1) и SO_4^- значок (2) уравнения для тока, учитывающие миграционную и диффузионную компоненты тока в т.н. приближении Нернста–Планка запишутся в виде:

$$\vec{j} = \vec{J}_1 = e_0 b_1 (z_1 c_1 \nabla \varphi - \varphi_0 \nabla c_1) \quad (3.1)$$

$$0 = \vec{J}_2 = e_0 b_2 (z_2 c_2 \nabla \varphi - \varphi_0 \nabla c_2) \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (3.3)$$

$$\rho = e_0 (z_1 c_1 + z_2 c_2) = -\epsilon \epsilon_0 \Delta \varphi \quad (3.4)$$

Для случая сильного электролита диссоциация молекул соли полная и поэтому в правой части уравнения 3.3 стоит ноль, т.е. реакции диссоциации и рекомбинации всегда уравновешены. Для слабых электролитов это не так. Эта система замкнута, записана для стационарного режима и содержит искомые функции: парциальные плотности заряда ионов и потенциал.

Подвижности ионов b и их валентности z известны, известна величина естественной единицы потенциала φ_0 . Ток пассивных ионов равен нулю, т.к. они не принимают участия в приэлектродных реакциях, а полный ток равен току ионов меди. Последнее уравнение системы является уравнением Пуассона и связывает объемный заряд, равный сумме парциальных ионных зарядов и потенциал.

Из уравнения 3.2 получаем уравнение связи парциального заряда пассивной компоненты и напряженности электрического поля:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi = -\frac{\varphi_0}{z_2} \frac{\nabla c_2}{c_2} = -\frac{\varphi_0}{z_2} \nabla \ln c_2$$

Таким образом, пассивная компонента, не участвуя в процессе токопереноса, определяет распределения электрического поля, которое определяется градиентом концентрации (проводимости). По определению удельная проводимость раствора: $\sigma = b_1 \rho_1 + b_2 \rho_2$. Будем для простоты считать подвижности ионов равными и обозначим их b . В качестве ма-

лого параметра задачи выберем объемный заряд. В приближении $\rho_1 \approx \rho_2$ получим:

$$\sigma = b \cdot (\rho_1 + \rho_2) \approx 2be_0c_1 \approx 2be_0c_2 \quad (3.5)$$

Тогда из уравнения (3.2) можно выразить напряженность поля через проводимость:

$$\vec{E} = -\frac{\varphi_0}{z_2} \nabla \ln \sigma \quad (3.6)$$

Суммируя и вычитая (3.1) и (3.2) и пренебрегая малыми членами в нулевом приближении, получим два определяющих уравнения: для тока (закон Ома) и для объемного заряда уравнение, определяющее его связь с градиентом проводимости:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = -\frac{\varphi_0}{z_2} \nabla \sigma \quad (3.7)$$

$$\rho = -\varepsilon \varepsilon_0 \Delta \varphi = -\varepsilon \varepsilon_0 \nabla \cdot \vec{j} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{j \cdot \nabla \sigma}{\sigma^2} \quad (3.8)$$

В одномерном случае, т.е. для плоских параллельных электродов, уравнение для тока (3.7) примет вид:

$$j = -\frac{\varphi_0}{z_2} \frac{d\sigma}{dx} = -\frac{\varphi_0}{Lz_2} \frac{d\sigma}{d\xi} \quad (3.9)$$

Здесь введена безразмерная координата $\xi = x/L$ ($\xi \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$), где L – межэлектродное расстояние. Решением (3.9) является:

$$\sigma = \sigma_0(1 + \beta\xi); \beta = -\frac{Lz_2j}{\varphi_0\sigma_0} \quad (3.10)$$

Подставляя решение для концентрации пассивных ионов в уравнение (3.6) для тока получаем выражение для напряженности поля E и плотности объемного заряда:

$$E = -\frac{\varphi_0}{z_2} \frac{\nabla \sigma}{\sigma} = \frac{j}{\sigma} = E_0(1 + \beta\xi)^{-1}$$

$$\rho = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{j \cdot \nabla \sigma}{\sigma^2} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{j\sigma_0}{L\sigma_0^2} \frac{\beta}{(1 + \beta\xi)^2} = \rho_0 \frac{\beta}{(1 + \beta\xi)^2}$$

Интегрируя E по межэлектродному промежутку, получаем вольтамперную характеристику, т.е. зависимость безразмерного тока от напряжения, а затем раскрывая β , получаем размерную вольтамперную характеристику ячейки:

$$U = -E_0L \int_{-1/2}^{1/2} \frac{d\xi}{(1 + \beta\xi)} = -\frac{E_0L}{\beta} \ln \frac{2 + \beta}{2 - \beta} = -\frac{E_0L}{2\beta} \operatorname{atanh} \frac{\beta}{2}$$

$$j = 2\sigma_0E_0 \tanh \frac{U}{2\varphi_0} \quad (3.11)$$

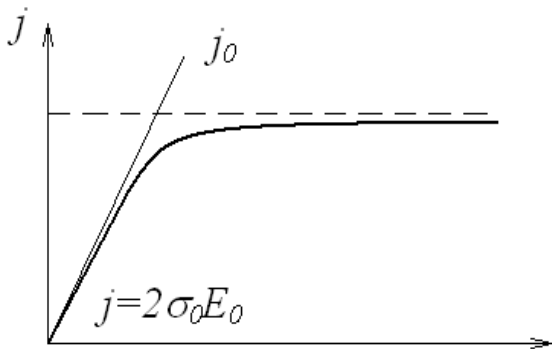


Рис. 3.1. Вольтамперная характеристика ячейки.

На рис. 3.1 приведен вид вольтамперной характеристики ячейки с плоскими медными электродами в растворе медного купороса. Она имеет линейный участок и участок насыщения. На линейном участке распределения проводимости постоянно, объемный заряд отсутствует, напряженность поля постоянна, выполняется закон Ома. При напряжениях, превышающих значение φ_0 начинают проявляться нелинейности: проводимость у катода падает, а у анода наоборот – повышается (см. рис. 3.1). В области пониженной проводимости напряженность поля

вырастает и появляется объемный заряд, противоположного с электродом знака, экранирующий поле в объеме ячейки. Причиной описанных явлений является наличие диффузионного тока. Ионы меди возникают на аноде, мигрируют через раствор и оседают на катоде, а отрицательные ионы скапливаются у анода и диффундируют в обратном направлении, создавая градиент проводимости. Неоднородное распределение проводимости приводит к перераспределению напряженности поля и появлению объемного заряда в жидкости.

Таким образом, простейший пример электродов первого рода показывает, что протекание электрического тока в классическом сильном электролите, приводит к неоднородному распределению концентрации, а, следовательно, и проводимости, а также появлению объемного заряда. Это является следствием наличия диффузионного тока в электролите, плотность которого не зависит от направления напряженности поля, а определяется только градиентом концентрации ионов.

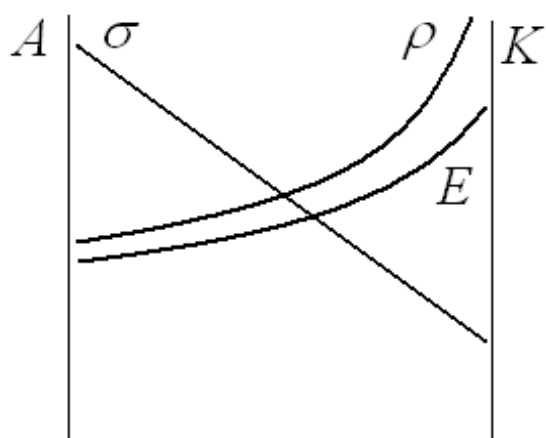


Рис. 3.2. Распределение проводимости, электрического поля и плотности заряда в межэлектродном промежутке.

Из рис. 3.2 видно, что при протекании тока в электролитической ячейке устанавливается неоднородное распределение σ и E , а, следовательно, имеется объемный заряд. Нелинейные эффекты возрастают по мере роста напряжения U , препятствуя проникновению электрического поля в раствор и ограничивая ток в электролите. На практике по мере роста напряженности поля у катода включаются новые реакции, например, пассивные ионы могут вступить в приэлектродный обмен. Т.е. появляется качественный скачок, приводящий к изменению условий задачи. Однако в сильных электролитах описанные эффекты появляются в невысоких электрических полях, порядка 25 мВ/см, при этом токи достаточно велики и могут достигать единиц и десятков ампер. В слабых электролитах ситуация иная. В них, как будет показано позже, диффузные слои могут привести к сильным градиентам поля.

Следует отметить, что протекание тока через систему первого рода: типа Cu_2SO_4 с медными электродами всегда сопровождается растворением одного из электродов, то есть процесс необратим во времени. Однако в электрохимии известны также обратимые системы – окислительно-восстановительные, прохождение тока через которые не сопровождается химическими изменениями в системе.

Таким образом, резюмируя приведенный анализ необходимо отметить, что протекание тока в хорошо проводящем водном электролите протекает при относительно небольших электрических полях, порядка 0,025 В/см, при более высоких полях возникает приэлектродный заряженный слой, экранирующий поле и ограничивающий ток. Диффузия играет существенную роль в процессах токопрохождения, поэтому этот механизм появления объемного заряда называется диффузионным. По мере уменьшения концентрации ионов электролита степень экранировки поля спадает и поле начинает проникать в жидкость. В слабых электролитах возникновение приэлектродных заряженных слоев может происходить, как будет показано далее, также и из-за неравновесных диссоционно-

рекомбинационных процессов. Следует отметить, что этот анализ проведен без учета существования т.н. двойных слоев. Считалось, что образование ионов меди на границе происходит беспрепятственно, а ионы SO_4 не образуются вообще. В этих условиях основной причиной появления объемного заряда является диффузия. Плотности возникающего заряда невелики, диапазон возможных напряженностей электрического поля порядка 0,1 В/см. Знак возникающего заряда противоположен знаку электрода, а возникающие Кулоновские силы малы. В этих условиях возможные скорости ЭГД-течений незначительны, порядка 10^{-7} м/с.

Ионно-обменный механизм образования заряда на границе металлический электрод-раствор.

Рассмотрим подробнее механизм ионообразования в водных электролитах, опираясь на классические представления теоретической электрохимии [3.6].

Известно, что одной из наиболее общих причин возникновения скачка потенциала на границе металл – водный электролит считается самопроизвольный обмен заряженными частицами на границе раздела фаз. В момент появления контакта между металлом и раствором этот обмен протекает самопроизвольно преимущественно в каком-либо одном направлении, в результате чего создается избыток частиц данного знака заряда по одну сторону границы раздела и их недостаток по другую. Такой некомпенсированный обмен приводит к созданию у границы двойного электрического слоя, а, следовательно, к появлению разности потенциалов между фазами. Последнее в свою очередь будет влиять на кинетику межфазного обмена, выравнивая скорости перехода заряженных частиц в обоих направлениях. По мере увеличения скачка потенциала в пограничной фазе наступит равновесие, когда уже не будет больше преимущественного перехода частиц из одной фазы в другую, и скорости перехода заряженных частиц в обоих направлениях сравняются. Заряженными частицами, принимающими участие в обмене между фазами, могут быть положительные и отрицательные ионы, а также электроны. Какие именно частицы переходят из одной фазы в другую и тем самым обуславливают возникновение скачка потенциала, определяется природой граничащих фаз. Рассмотрим наиболее простой случай электродов первого рода, т.е. границы металл – раствор соли металла, при котором в обмене участвуют ионы металла.

Справедливость предположения об обмене ионами между металлом и раствором в ходе установления равновесного потенциала (и при его достижении) была доказана многими исследованиями с помощью меченых атомов, выполненными уже после того, как Нернст предложил свою теорию. Если к металлу электрода (удобнее всего такие опыты проводить с амальгамами металлов) добавить определенное количество его радиоактивного изотопа, а затем привести в контакт с раствором соли этого же металла, то через некоторое время раствор также начнет обнаруживать радиоактивные свойства. Аналогичный результат получается, если приготовить раствор соли электродного металла с некоторым содержанием его радиоактивного изотопа, а электрод изготовить из нерадиоактивного металла. Тогда через некоторое время электрод также становится радиоактивным. Подобный эффект можно получить естественно, лишь в том случае, если существует обмен ионами между электродом и раствором.

При помощи этого, а также ряда других методов удалось не только подтвердить сам факт обмена ионами, но и количественно оценить его. Поскольку в обмене участвуют заряженные частицы, то его интенсивность можно выразить в токовых единицах при помощи токов обмена I . Величины токов обмена для ряда электродов приведены в табл. 3.1. Интенсивность обмена зависит от природы электрода и изменяется в широких пределах. Причиной ионного обмена является взаимодействие молекул воды и ионов металла, находящихся на границе.

Таблица 1. Токи обмена для ряда электродов при комнатной температуре

Электрод	Раствор	Ток обмена, А/см ²
$H^+ / H_2, Hg$	1,0 н. H_2SO_4	$5 \cdot 10^{-13}$
Ni^{2+} / Ni	2,0 н. $NiSO_4$	$2 \cdot 10^{-9}$
Fe^{2+} / Fe	2,0 н. $FeSO_4$	10^{-8}
Zn^{2+} / Zn	2,0 н. $ZnSO_4$	$2 \cdot 10^{-5}$
Cu^{2+} / Cu	2,0 н. $CuSO_4$	$2 \cdot 10^{-5}$
$Zn^{2+} / Zn, Hg$	$2 \cdot 10^{-3}$ н. $Zn(NO_3)_2$ + 1,0 н. KNO_3	$7 \cdot 10^{-4}$
$H^+ / H_2, Pt$	0,2 н. H_2SO_4	$1 \cdot 10^{-3}$

При погружении металла в раствор, содержащий его ионы, сразу же начинается обмен ионами между металлом и раствором. У обращенной к раствору поверхности металла можно найти и ионы металла, и адсорбированные молекулы воды (рис.3.3). Молекулы воды (или другого растворителя), адсорбируясь и ориентируясь определенным образом на границе раздела двух фаз, могут взаимодействовать с ионами, находящимися в металле, и при известных условиях вырывать их из металлической решетки. Ионы металла также могут переходить из водной фазы в металлическую, теряя при этом свою гидратную оболочку и входя в состав кристаллической решетки электрода.

Следовательно, величина электродного потенциала должна зависеть, как от прочности связи иона в кристаллической решетке металла, так и от энергии гидратации иона.

Так как ионы заряжены, то их преимущественный переход в какую-либо одну фазу приведет к появлению в ней положительного заряда, в то время как другая фаза зарядится отрицательно.

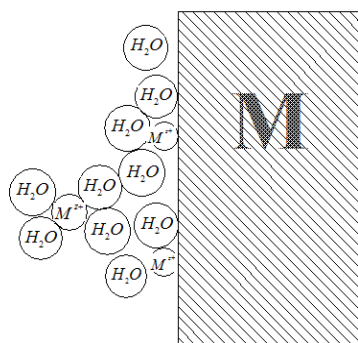


Рис. 3.3. Модель пограничного слоя металл-раствор при возникновении скачка потенциала на этой границе.

На рис. 3.3 приведена схема межфазного обмена. Скорость прямого обмена пропорциональна концентрации молекул растворителя, а скорость обратного обмена концентрации ионов. В любом из этих случаев разность потенциалов, возникшая в результате неравномерного распределения зарядов, будет ускорять медленный процесс и тормозить быстрый, как это свойственно обменному механизму возникновения межфазного скачка потенциалов. Через некоторый (очень малый) промежуток времени скачок потенциала уравнивает скорости обмена в обоих направлениях. Потенциал далее не будет изменяться, сохраняя постоянное значение, отвечающее рав-

новесию между металлом и раствором. Точно так же скорости перехода ионов в направлениях раствор – металл и металл – раствор сделаются постоянными и равными по величине току обмена.

Таким образом, анализ теоретических работ по исследованию контакта металл-диэлектрик, а также металл-электролит показывает, что в рассматриваемой области образуется заряженный слой, обусловленный различием работ выхода из контактирующего металла и энергии сродства к электрону (энергии ионизации) примесных молекул. Пограничный ток контакта металл-электролит на катоде определяется разницей работа выхода с поверхности металла и энергией сродства к электрону окисленной формы, а на аноде – разницей энергии ионизации восстановленной формы и работой выхода с поверхности металла. Применение формул (3.21) для непосредственного расчета анодного и катодного токов затруднительно т.к. остается неизвестной связь перенапряжения с напряженностью поля у инжектирующего электрода. Кроме того, в реальных условиях необходим учет диффузии, конвекции, миграции, т.е. решение полной системы ЭГД уравнений. О существовании двойного слоя можно судить по изучению электрокинетических явлений, например, измеряя потенциал течения.

Структура двойного слоя

Чтобы описать структуру двойного слоя в сильном электролите построим модель в пакете COMSOL. Для этого запишем систему уравнений Пуассона-Нернста-Планка (ПНП) в следующем виде:

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \nabla(-D\nabla c_1 - z_1 b F c_1 \nabla \varphi) = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \nabla(-D\nabla c_2 - z_2 b F c_2 \nabla \varphi) = 0 \quad (3.13)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (3.14)$$

$$\rho = F \cdot (c_1 - c_2)$$

Основными проблемами при моделировании являются: 1) определение функции приэлектродного тока обмена, 2) задание условий по электростатике.

Упрощенная модель двойного диффузного слоя

Будем решать задачу для двух электродов, погруженных в жидкость. Как уже отмечалось в предыдущих параграфах при контакте электрода с раствором на границе раздела электрод-жидкость возникают токи обмена, вызывающие формирование в жидкости двойного слоя. Этот слой в свою очередь вызывает электрическое поле двойного слоя и появление разности потенциалов между жидкостью и электродом. В COMSOL имеется несколько типов задания граничных условий. Искомые функциями в уравнениях являются плотности парциальных зарядов ионов и потенциал, для потенциала на границе задается условие заземления, для концентраций наиболее известным условием являются токи обмена.

Для определенности на левой границе зафиксируем нулевой потенциал. На правой границе задается т.н. «плавающий потенциал», т.е. потенциал равный потенциалу на предыдущем шаге решения. В случае электродов первого рода на аноде идет реакция

электрорастворения, т.е. электрод избирательно взаимодействует только с одним типом ионов - в нашем случае с отрицательными. Поэтому для частиц первого сорта (положительных) зададим условие непроникновения ионов на обеих границах интервала. Для частиц второго сорта (отрицательных) на левой границе зададим токи обмена, т.е. условия рождения и гибели ионов. В начальный момент контакта электрода с жидкостью под действием взаимодействия молекул растворителя, т.е. молекул диэлектрической жидкости у поверхности электрода образуются отрицательные ионы, т.е. возникает прямой ионный ток J , далее по мере накопления ионов у поверхности электрода и образования разности потенциалов между жидкостью, возникает обратный ток гибели, пропорциональный концентрации накопившихся ионов.

$$J = 10^{10} \cdot \left(1 - K \frac{c_2}{c_0}\right)$$

В данной модельной зависимости задается некоторое начальное значение для прямого тока обмена, которое по мере роста концентрации инжектируемых ионов уменьшается практически до нуля за счет возникновения встречного тока гибели ионов. Значение концентрации, при котором обменный ток равняется нулю, определяется коэффициентом гибели $K = 0.001$, то есть при достижении концентрации ионов превышающей начальную в 1000 раз считается предельным в данной задаче. Значение начальной концентрации ионов в растворе определяется по формуле: $c_0 = \frac{\sigma_0}{2e_0b}$. Проводимость в данной задаче была выбрана равной: $\sigma_0 = 10^{-10}$ См/м. Это соответствует проводимости технического трансформаторного масла.

В результате решения задачи получаем следующие распределения концентрации положительных и отрицательных ионов в разные моменты времени после контакта электродов с жидкостью: Как видно из рис. 3.4 после контакта металла с жидкостью у электрода (слева) в результате его взаимодействия с жидкостью начинается рост концентрации положительных ионов, что вызывает дисбаланс между начальной концентрацией положительных и отрицательных ионов, т.е. появление объемного заряда и обусловленного им электрического поля, направленного к электроду. Под действием этого поля отрицательные ионы, имеющиеся в жидкости, мигрируют от электрода в жидкость, и их концентрация в приэлектродной области падает, а вновь образованные и имеющиеся в жидкости положительные ионы наоборот притягиваются к электроду, и их концентрация у электрода растет.

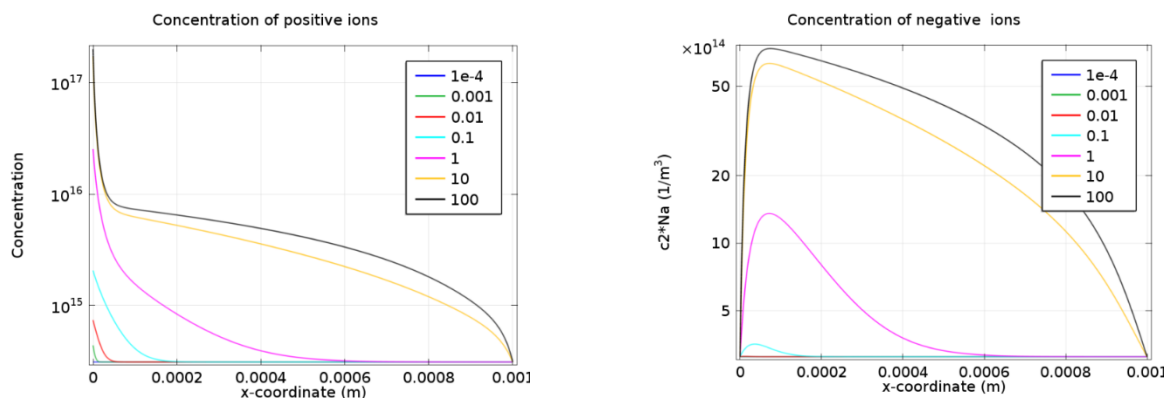


Рис. 3.4 Распределение концентрации положительных и отрицательных ионов

Из этих графиков можно сделать вывод о том, что при выбранном значении проводимости, подвижности и тока, установление диффузионного слоя для ионов происходит за время порядка 10 сек. В результате этого процесса концентрация отрицательных ионов вблизи этого электрода уменьшается, и они дрейфуют в противоположную сторону. В результате этого процесса у поверхности металла в ячейке устанавливается следующее распределение плотности объемного гетерозаряда (см. рис.3.5).

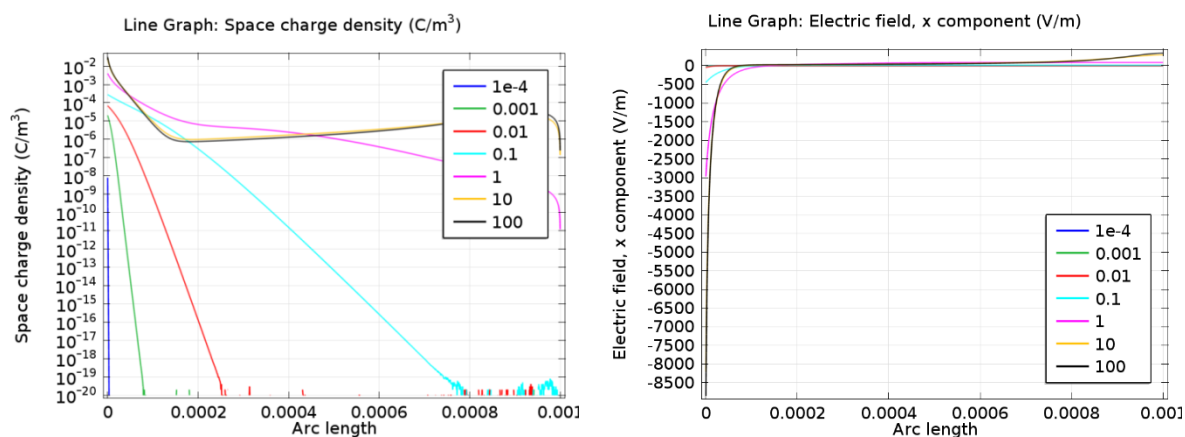


Рис.3.5.Распределение объемного заряда и напряженности поля

Поскольку на всем протяжении МЭП концентрация положительных ионов превышает концентрацию отрицательных, то заряд в основном положительный и сосредоточен вблизи электрода. Распределение напряженности электрического поля вблизи активного электрода также неоднородно, поле у положительного электрода существенно повышено.

Таким образом в приэлектродной области формируется слой повышенной концентрации положительных ионов, в пределах которого жидкость теряет электронейтральность. Область локализации объемного заряда и повышенной напряженности электрического поля в жидкостях с уровнем проводимости порядка 100 пСм/м невелика, 25-30 мкм от левого электрода, однако напряженность поля в приэлектродной области весьма значительна: до 1 кВ/м.

Резюмируя изложенные результаты следует заметить: ионно-обменный механизм формирования двойных слоев на границе металл-жидкость приводит к образованию тонких приэлектродных гетеро заряженных слоев, которые принято называть двойными приэлектродными слоями. ЭГД-течения в подобных условиях не возникают, т.к. слои тонкие и Кулоновские силы в них прижимают жидкость к электроду.

Электрокондуктивный механизм образования заряда.

Еще одна возможная причина появления объемного заряда, это повышенная диссоциация молекул жидкости, либо примесей в сильном электрическом поле. В естественных условиях проводимость среды обусловлена термоионизацией молекул примесей. При этом связь между проводимостью среды и ее температурой определяется формулой Френкеля [3.1]: $\sigma \approx \exp(-T_0/T)/T$. Эта зависимость проверялась в экспериментах Остроумова с трансформаторным маслом и другими диэлектрическими

жидкостями [3.1]. Рассмотрим вслед за Остроумовым, механизм, названный им электрокондуктивным механизмом образования заряда. Этот механизм становится понятным из анализа основополагающих соотношений: уравнения Пуассона и закона сохранения заряда в стационарном случае, учитывающего лишь миграционную составляющую тока. Считается, что концентрация ионов в слабом электролите может изменяться под действием сильного электрического поля. Причины изменения проводимости рассмотрим позже:

$$\begin{aligned}\rho &= \nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}), \\ \nabla \cdot \vec{j} &= 0; \vec{j} = \sigma \vec{E}\end{aligned}\quad (3.15)$$

Исходя из уравнения Пуассона и закона сохранения заряда и считая диэлектрическую постоянную константой, Остроумов показал, что объемный заряд пропорционален градиенту проводимости:

$$\rho = \vec{j} \cdot \nabla \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\sigma} = - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \vec{j} \cdot \nabla \sigma}{\sigma^2} \quad (3.16)$$

Как было показано в предыдущей главе при сравнительно низких напряжениях выполняется дифференциальный закон Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E} (\sigma > 0)$, который дает в подавляющем большинстве случаев определенное и воспроизводимое значение электропроводности σ *электролита*. В частности, это значение σ закономерно изменяется в функции от некоторых физических параметров, например, от температуры опыта или от концентрации растворенных в жидкости примесей. Однако при исследовании слабо проводящих жидкостей при высоких напряжениях встречаются и противоположные случаи, когда экспериментально наблюдаемое значение локальной удельной электропроводности жидкости теряет определенность и воспроизводимость, например, изменяются при изменении материала электродов. Причинами возникновения неоднородностей (σ) в среде могут быть электрохимические процессы, локальная диссоциация молекул под действием джоулева тепла либо вынужденного нагревания жидкости, сильного электрического поля, жесткого излучения, присутствия в жидкости примесей. Неоднородности диэлектрической проницаемости могут возникнуть в основном под влиянием температурных градиентов. Попробуем определить, насколько эффективно действие составляющей силы, связанной с неоднородностью проводимости. Механизм возникновения этой составляющей довольно прост. Выделим в жидкости с проводимостью σ_1 область с проводимостью σ_2 ($\sigma_2 > \sigma_1$). В отсутствие поля область электронейтральна, т.е. положительные и отрицательные ионы распределены равномерно. При наложении внешнего поля происходит разделение зарядов: положительные ионы в области капли с высокой проводимостью смещаются по вектору поля, а отрицательные – против него, образуя на границах раздела положительный и отрицательный заряды соответственно. Когда $\sigma_2 \gg \sigma_1$, влиянием ионов окружающей среды с проводимостью σ_1 можно пренебречь. Под влиянием возникших кулоновских сил жидкость с повышенной проводимостью будет растягиваться вдоль силовых линий поля. Но насколько эффективно действие электрокондуктивной силы? Чтобы яснее представлять порядок величин, проведем оценки на молекулярном уровне [3.7]. Известно, что ЭГД-явления наиболее эффективны в "жидких диэлектриках", точнее – в слаб проводящих жидкостях, например, в трансформаторном масле с проводимостью $10^{-12} \text{ (Ом}^* \text{м)}^{-1}$ и кинематической вязкостью 20 сСт . По номограмме из работы [3.8] подвижность ионов оценивается как

$b = 10^{-4} \text{ см}^2 / (B \cdot c)$. Предположим, что ионы равно валентны и обладают единичным зарядом. По определению, проводимость бинарного равно валентного электролита рассчитывается как $\sigma = ezb c + ezb c = 2ebc$. Определим концентрацию ионов: $c = \sigma / (2e b)$. Она по порядку соответствует 10^{11} . Следовательно, и концентрация заряженных ионов на границе раздела также не может превышать общей концентрации. Количество молекул в 1 см^3 трансформаторного масла приблизительно равно 10^{22} . Таким образом, на каждый заряженный ион вдоль границы раздела приходится порядка 10^{11} нейтральных молекул жидкости. Размер такого комплекса составляет 10^{-3} см . В свете приведенных оценок вопрос об эффективности действия электрических кулоновских сил является проблематичным и требует экспериментальной проверки. Для исследования действия кулоновских сил на заряженные области повышенной проводимости авторами использовался метод подкрашенных примесей. Для применения его к классу электроизолирующих жидкостей необходимо было найти вещество, растворяющееся в них, заметно повышающее их проводимость и изменяющее окраску. Таким веществом оказался йод. Исследования проводились в медицинском вазелиновом масле, так как оно характеризуется малой собственной удельной проводимостью $\sigma = 10^{-13} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$, бесцветностью, прозрачностью, большой вязкостью. Кроме того, вазелиновое масло растворяет йод кристаллический ($\sigma = 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$), изменяя свою окраску от бледно-розовых до темно-вишневых тонов и увеличивая проводимость до $10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. Из-за большой вязкости окрашенные области (в дальнейшем называемые "проводящими" относительно бесцветных областей менее проводящего чистого масла), внедренные в чистое вазелиновое масло, в течение десятков минут не рассасывались, оставаясь четко ограниченными. Капли окрашенного масла в чистом масле медленно тонули, сохраняя правильную сферическую форму. Таким методом исследовалось воздействие электрического поля на шаровую фракцию "проводящего" вазелинового масла, внедренную в середину межэлектродного промежутка плоского конденсатора, который был заполнен чистым вазелиновым маслом. "Проводящая" капля окрашенного йодом масла вводилась в чистое пипеткой. Таким способом удавалось получить капли правильной шарообразной формы. Деформация шарообразной проводящей области под действием электрических сил заключалась в растяжении ее вдоль силовых линий поля в эллипсоид, большая полуось которого является нормалью по отношению к электродам.

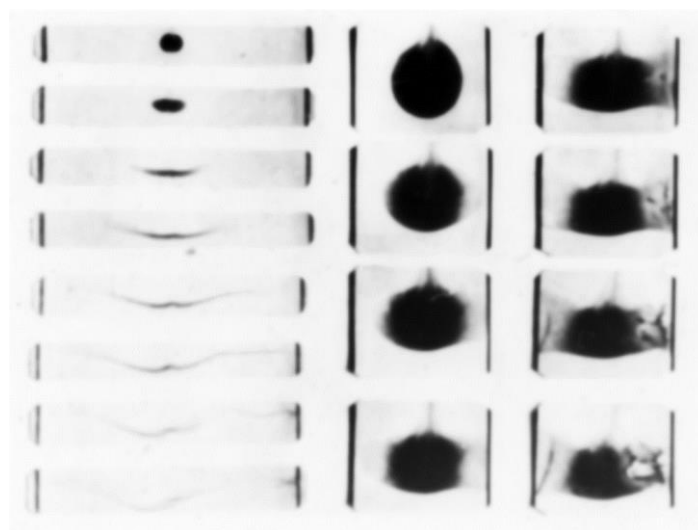


Рис. 3.6. Деформация капли повышенной проводимости в электрическом поле.

После растягивания шара в эллипсоид наблюдается заострение головок эллипсоида с вытягиванием их к близлежащим электродам. Таким образом, капля деформируется в нить до образования мостика "проводящей" жидкости между электродами. Прогиб центра нити обусловлен более быстрым опусканием этой тяжелой средней части в гравитационном поле. Замеры средней скорости продвижения головок проводящего эллипсоида при напряжении 1 кВ ($E \approx 0,5$ кВ/см) показали, что она с точностью до $20 \div 30$ % остается постоянной вдоль нормали к электродам. При этом скорость продвижения к катоду на $30 \div 50$ % выше скорости продвижения к аноду. Зависимость скорости продвижения головки "проводящего" вазелинового масла от средней напряженности электрического поля соответствует квадратичной зависимости скорости от средней напряженности электрического поля в ячейке:

$$v = k_1 \bar{E}^2 \quad (3.17)$$

Определим ЭГД- подвижность: $b_T = v_T / E$. В соответствии с формулой (3.17) величина b_T пропорциональна средней напряженности поля: $b_T = k_2 \bar{E}$. Известно, что радиус ионов по порядку составляет 10^{-10} м. Подвижность ионов в вязких органических жидкостях можно определить по формуле Вальдена-Стокса: $\eta b = c$. Для вазелинового масла $\eta = 10^{-1} \text{ м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$, а $b = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 / (\text{с} \cdot \text{В})$, что соответствует оценкам по номограмме из работы [3.8]. В то же время в полях до $100 \text{ кВ} / \text{см}$ ионная подвижность остается практически постоянной.

Электрическое число Рейнольдса, имеющее смысл относительной подвижности, оказывается также пропорциональным средней напряженности поля:

$$\text{Re}_{\text{эл}} = \frac{b_r}{b_n} = \frac{k_2}{b_n} E \quad (3.18)$$

и в исследованном диапазоне напряжений оно много больше единицы. Это означает, что при напряжениях, соответствующих заметным ЭГД-эффектам, скорости ионного дрейфа много меньше скорости гидродинамического перемещения, т.е. заряд практически "вморожен" в жидкость. Сопоставляя эти результаты с численными оценками, проведенными на молекулярном уровне, получаем, что каждый отдельный ион оказывается "вмороженным" в молекулярный комплекс (домен), состоящий из $10^{10} \div 10^{11}$ молекул, линейные размеры которого составляют $1-10^2 \text{ мкм}$.

Рассмотрим еще один механизм передачи импульса от иона к нейтральной среде: передача импульса за счет сил вязкого трения [3.9]. Будем считать, что каждый ион окружен сферической сольватной оболочкой из нейтральных молекул, причем размеры сольватной оболочки, как принято считать не превышает десятка молекулярных слоев. Будем считать, что на более далекие расстояния импульс передается за счет обычных сил вязкого трения. В этом приближении будем считать уравнения описания макроскопической среды применимыми для анализа процесса диффузии импульса от сольватной оболочки к нейтральной среде. В режиме стоковского сопротивления уравнение Навье- Стокса (без учета градиента давления) выглядит как уравнение диффузии:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \nu \Delta \vec{V} \quad (3.19)$$

Аналогом коэффициента диффузии выступает кинематическая вязкость ν . В данном режиме можно считать, что импульс диффундирует во все стороны от источника импульса. Из уравнения следует, что характерное время, необходимое для диффундирования импульса на расстояние x от источника, составляет:

$$t = \frac{x^2}{\nu} \quad (3.20)$$

С ростом расстояния время на транспортировку возрастает квадратично, таким образом, диффузионная транспортировка импульса на большие расстояния затруднена. Поэтому значительно выгоднее иметь большое количество маленьких источников импульса, например, ионов, чем один большой. Если в заряженной среде среднее расстояние между ионами составляет $d_i = n_i^{-3} = 5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-7}$ м, то в центральной струйке ЭГД-течения образуется разреженная ионная матрица, в которой между двумя соседними ионами находится несколько сотен тысяч молекул. Однако, несмотря на это, импульс полученный ионом, передается молекулярному окружению за характерное время диффузии, лежащее в жидкости с вязкостью порядка 0,01 ст., в диапазоне $t = d_i^2/\nu = 2,5 \cdot (10^{-10}$ сек). Принципиально важным здесь является наличие ионной матрицы. Если рассмотреть один ион, движущийся в неподвижной жидкости со скоростью V_i , вязкость установит в окружающем пространстве неоднородное распределение скоростей $V_x(r) \sim (R/r)V_i$, где R – радиус объема присоединенной нейтральной среды, которая движется вместе с ионом. Скорость будет быстро падать с удалением от иона, и можно сказать, что увлекаться будет лишь небольшая область вокруг иона размером порядка R . В случае одного иона поток импульса может неограниченно распространяться в окружающую жидкость. То же будет происходить, если матрица, содержит разн полярную ионную структуру. Однако, при наличии униполярной ионной матрицы, на расстоянии $d/2$ поток импульса встретит противоположно направленный поток от соседнего иона. Таким образом, вокруг каждого иона можно выделить ячейку жидкости порядка d (показаны пунктиром на рисунке 3.7, из которой импульс выходить не может. Поскольку в электрическом поле на каждый ион действует электрическая сила, постоянно производящая импульс, то импульс будет накапливаться в ионной ячейке, пока межъячеечные градиенты скорости не выровняются, и потоки импульса останутся в основном на границах заряженной области с нейтральной средой. Малая величина локальных градиентов скорости между ионом и средой и означает вмероженности иона в среду. Оценим степень вмероженности заряда исходя из реальных значений величин.

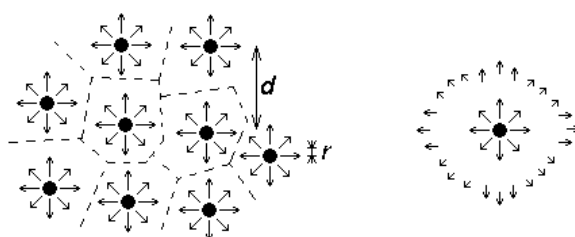


Рис. 3.7. В случае одиночного иона в жидкости импульс может диффундировать на неограниченные расстояния (*справа*), но, если ионов много, потоки импульса от соседних ионов встречаются и импульс может распространяться только на расстояние порядка меж ионного (*слева*).

В ЭГД-течениях импульс, передаваемый электрическим полем ионам, преобразуется в импульс центральной струйки заряженной жидкости и идет на сопротивление силам вязкого трения с окружающей ее нейтральной средой. Однако для транспортировки импульса в меж ионное пространство, необходимы некоторые градиенты скорости между ионом и средой. Рассмотрим модельную задачу. Пусть у игольчатого электрода возникает

заряженная шаровая область радиусом R , движущийся в незаряженной покоящейся жидкости того же сорта (рисунок 3.8). Шаровая область заполнена ионами одного знака со средним расстоянием между ионами $d = n_i^{-1/3}$. Миграционная скорость ионов относительно движущейся жидкости V_i , скорость жидкости в шаре V_h . Радиус сольватной оболочки иона, движущейся с той же скоростью, что и ион – r .

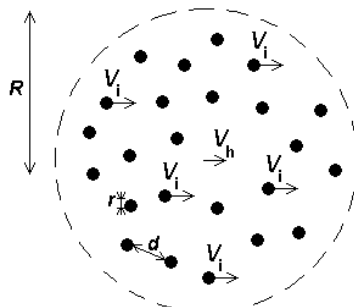


Рис.3.8. Движение шара заряженной жидкости в неподвижной среде.

Большой заряженный шар, движущийся под действием электрического поля со скоростью V_h в окружающей его вязкой неподвижной жидкости, испытывает силу сопротивления (допустим, что Стоксовскую) равную для жидкого шара $4\pi R\eta V_h$. Эта сила компенсируется передачей импульса от сольватных оболочек отдельных ионов, поскольку ионные оболочки передают среде импульс через вязкость, один ион передает импульс: $4\pi r\eta V_i$. Приравняв источник импульса и его сток, учтя количество ионов в шаре $N_i = n_i(4/3)\pi R^3$, мы получаем:

$$RV_h = \frac{4}{3}\pi \frac{R^3}{d^3} r(V_i) \quad (3.21)$$

Или:

$$\frac{V_i}{V_h} = \frac{3}{4\pi} \frac{d}{R} \left(\frac{d}{R} \right)^2 \quad (3.22)$$

Если мы возьмем радиус заряженного шара равным радиусу заряженной части центральной струи течения $R=1$ мм, d - размер области увлекаемой отдельным ионом $=5 \cdot 10^{-6}$ м, а радиус сольватной оболочки иона $r=10$ нм, получим соотношение скоростей 0,003:

$$\frac{V_i}{V_h} = 0,003 \quad (3.23)$$

Это означает, что электрическое число Рейнольдса может достигать 330, т.е. достаточно сильную вмерзнутость ионов в окружающую жидкость. Ввиду большой разницы суммарного импульса, переданного ионами заряженному шару и отданного им окружающей среде, оказывается возможным накопление импульса в каждой ионной ячейке и в целом в шаре, причем скорость движения шара может оказаться значительно выше скорости движения сольватных оболочек отдельных ионов. Однако поскольку ионы движутся вместе с шаром, всегда остается небольшое превышение их скорости над скоростью движения шара, что и компенсирует отток импульса из шара за счет вязкого трения. Так, например, при поле в 10^6 В/м и подвижности ионов $\mu=5 \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с) скорость ионов $V_i = 0,05$ м/с, а возможная скорость жидкости в заряженном шаре равна 16,6 м/с. Это значение приблизительно на порядок выше значений, обычно наблюдаемых в экспериментах по изучению

ЭГД-течений. При более высоких плотностях заряда можно реализовать более высокую степень замороженности и более высокие скорости течения.

Таким образом, для эффективной работы ЭГД-устройств необходима достаточно высокая плотность объемного заряда. При соблюдении этого условия на временах более чем 1 нсек можно считать, что ионы заморожены в жидкость, а Кулоновская сила приложена к жидкости в целом. ЭГД-течение в свете изложенных представлений следует представить, как предельный случай устройств, передающих импульс среде, в котором в качестве источника импульса используются наночастицы - отдельные ионы. Поэтому, эффект передачи импульса нейтральной среде при оптимальном соотношении вязкости среды и плотности вводимого в жидкость заряда максимально высок. Учитывая, что межионные расстояния при оптимальной плотности заряда составляют микрометры, а сольватные оболочки ионов десятки нанометров электрогидродинамический способ преобразования энергии электрического поля в энергию движения жидкости является нанотехнологией, а технологии разрабатываемые на основе использования ЭГД - течений, следует назвать нанозлектрогидродинамическими технологиями.

Приэлектродные неравновесные ионизационно-рекомбинационные слои [3.11 -16].

Приэлектродные заряженные слои возникают в слабо проводящих жидкостях из-за различных причин. В слабо проводящих жидкостях определяющую роль играет неравновесный механизм дисбаланса между процессами диссоциации и рекомбинации ионов. Несмотря на то, что этот вопрос имеет долгую историю исследования, он до сих пор остаётся актуальным и регулярно обсуждается на современных конференциях. Жидкие диэлектрики относятся к классу слабых электролитов, в которых степень диссоциации примесных молекул ничтожна, т.е. существенно меньше 1. Например, при растворении йода в трансформаторном масле степень диссоциации молекул йода не превышает 10^{-6} . Для описания токопрохождения в таких жидкостях полная система уравнений должна содержать функции, описывающие диссоциацию и рекомбинацию примесных молекул или, точнее, ионных пар. В настоящем параграфе приведена простая модель, позволяющая описать с единых позиций большинство известных зарядовых структур, руководствуясь уравнениями Нернста-Планка для слабых электролитов. Подобный механизм рассматривался также в работах [3.17, 3.18].

Рассмотрим приэлектродные диссоциационно-рекомбинационные слои в системе электродов плоскость-плоскость с учётом миграционного и диффузионного механизмов переноса ионов, а также инжекционного и диссоциационного механизмов зарядообразования. Следует отметить, что двойные приэлектродные слои в данном не рассматриваются, поскольку они требуют отдельного математического описания, а также имеют менее существенное влияние на процессы токопрохождения в объёме.

Система уравнений, описывающая процессы токопрохождения сквозь неподвижные жидкие диэлектрики, содержит уравнение Нерста-Планка и уравнение Остроградского-Гаусса:

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (3.24)$$

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \text{div}(\vec{j}_i) = W - a_r n_i n_{j \neq i} \quad (3.26)$$

$$\vec{j}_i = n_i (Z_i b_i) \vec{E} - D_i \nabla n_i \quad (3.27)$$

$$\rho = \sum_i Z_i e n_i \quad (3.28)$$

где \vec{E} – напряжённость электрического поля, ρ – объёмная плотность заряда, φ – электрический потенциал, n – концентрация ионов, \vec{j} – плотность тока, g – функция источника; ε – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости, b – подвижность ионов, D – коэффициент диффузии ионов, Z_i – валентность ионов; ε_0 – диэлектрическая постоянная, e – элементарный электрический заряд, t – время; индекс i указывает на сорт ионов.

Запишем и обезразмерим исходную систему уравнений (3.24-3.28) при следующих предположениях и приближениях:

- одномерная постановка;
- есть только два сорта частиц;
- ионы обоих сортов одновалентны;
- коэффициенты диффузии и абсолютные значения подвижностей ионов одинаковы для ионов обоих сортов ($D_+ = D_- \equiv D$ и $b_+ = b_- \equiv b$);
- свойства ионов и жидкости постоянные (что справедливо при изотермичности жидкости и в области низких напряжений);
- скорость диссоциации постоянна (что справедливо в области низких напряжений);
- степень диссоциации очень мала (что справедливо для слабых электролитов).

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} + \frac{\partial j_+}{\partial x} = W_0 - a_r n_+ n_- \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial t} + \frac{\partial j_-}{\partial x} = W_0 - a_r n_+ n_- \quad (3.31)$$

$$j_{\pm} = \mp n_{\pm} b \frac{d\varphi}{dx} - D \frac{\partial n_{\pm}}{\partial x} \quad (3.32)$$

Зададим следующие граничные условия:

$$x \in [0, L], \quad \varphi(0) = U_0, \quad \varphi(L) = 0, \quad j_+(0) = j_{inj1}, \quad j_-(L) = j_{inj2}$$

Рассматриваемая система имеет следующие независимые размерности: В, Кл, м, с. При этом имеет смысл ввести два независимых параметра для концентраций и координаты (несмотря на то, что у них есть лишь только одна независимая размерность). В результате нужно ввести 5 характерных значений для проведения обезразмеривания. Обезразмерим переменные "В", "Кл", "м" и "1/м³" следующим образом: $x = x^* L$, $n = n^* n_0$, $\varphi = \varphi^* U_0$, $\rho = \rho^* e n_0$.

При отсутствии напряжения концентрация ионов равна равновесной n_0 , равновесная концентрация определяет низковольтную проводимость жидкости. Рассмотрим характерные масштабы по времени. Во-первых, за характерное время можно выбрать равновесное время установления диссоционно-рекомбинационных процессов:

$$\tau = \frac{n_0}{W_0} = \frac{1}{a, n_0} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\sigma_0} \quad (3.33)$$

С другой стороны, ещё есть характерное время миграции ионов через межэлектродный промежуток:

$$\tau = \frac{L}{bU_0 / L} = \frac{L^2}{bU_0} \quad (3.34)$$

В зависимости от размера приэлектродных слоёв, либо одно, либо другое время может оказаться меньшим. Однако более удобно, оказывается, использовать время миграции ионов (3.34), поскольку в этом случае получается естественное обезразмеривание для плотности тока:

$$j = j^* n_0 b \frac{U_0}{L}$$

Таким образом, единица времени – это время миграции ионов через МЭП, а единица измерения плотности тока – это равновесная плотность тока миграции:

$$t = t^* \frac{L^2}{bU_0}$$

Перепишем систему уравнений и граничные условия в безразмерном виде:

$$\frac{d^2(\varphi^* U_0)}{d(x^* L)^2} = -\frac{\rho^* e n_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial(n_+^* n_0)}{d(t^* L^2 / bU_0)} + \frac{\partial}{\partial(x^* L)} \left(-n_+^* n_0 b \frac{d(\varphi^* U_0)}{d(x^* L)} - D \frac{\partial(n_+^* n_0)}{\partial(x^* L)} \right) = W_0 (1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial(n_-^* n_0)}{d(t^* L^2 / bU_0)} + \frac{\partial}{\partial(x^* L)} \left(n_-^* n_0 b \frac{d(\varphi^* U_0)}{d(x^* L)} - D \frac{\partial(n_-^* n_0)}{\partial(x^* L)} \right) = W_0 (1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.37)$$

$$j_{\pm}^* = \mp n_{\pm}^* \frac{d\varphi^*}{dx^*} - \frac{D}{bU_0} \frac{\partial n_{\pm}^*}{\partial x^*} \quad (3.38)$$

$$x^* \in [0, 1], \quad \varphi^*(0) = 1, \quad \varphi^*(1) = 0, \quad j_+^*(0) = k_+, \quad j_-^*(1) = k_-$$

где k_{\pm} – это безразмерная инжекция на границе МЭП ($k_{\pm} = j_{inj1,2}/j_0$).

Преобразуем уравнение Пуассона (3.35) и выделим безразмерный параметр:

$$\frac{d^2 \varphi^*}{dx^{*2}} = -\rho^* \frac{e n_0 L^2}{U_0 \varepsilon \varepsilon_0}$$

или:

$$\frac{d^2 \varphi^*}{dx^{*2}} = -\rho^* \frac{\sigma_0 L^2}{2bU_0 \varepsilon \varepsilon_0} \quad (3.39)$$

В правой части получилась следующий безразмерный параметр:

$$P_1 = \frac{\sigma_0 L^2}{2bU_0 \varepsilon \varepsilon_0}.$$

Значение этого параметра определяет степень влияния объёмного заряда на напряжённость электрического поля: чем меньше P_1 , тем меньше влияние объёмного заряда на электрическое поле и наоборот. Теперь обезразмерим уравнения для тока (3.36, 37):

$$\frac{\partial n_+^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(-n_+^* \frac{d\varphi^*}{dx^*} - \frac{D}{bU_0} \frac{\partial n_+^*}{\partial x^*} \right) = \frac{L^2}{bU_0} \frac{W_0}{n_0} (1 - n_+^* n_-^*)$$

или:

$$\frac{\partial n_+^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(-n_+^* \frac{d\varphi^*}{dx^*} - \frac{D}{bU_0} \frac{\partial n_+^*}{\partial x^*} \right) = \frac{L^2 \sigma_0}{bU_0 \varepsilon \varepsilon_0} (1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.40)$$

В этом уравнении присутствуют два независимых безразмерных параметра: $P = \frac{\sigma_0 L^2}{bU_0 \varepsilon \varepsilon_0}$, $P_D = \frac{D}{bU_0}$. Параметр P характеризует роль диссоциационно-рекомбинационных процессов в объёме. Если P принимает большие значения, то объёмная диссоциация играет ключевую роль, что приводит к быстрому установлению равновесных концентраций в большей части объёма. Т.е. возмущение концентраций за счёт граничных условий (например, за счёт отсутствия инжекции со стенок) быстро исчезает и не проникает вглубь МЭП. Это соответствует случаю малого размера неравновесных слоёв по сравнению с МЭП. При этом сам параметр P , как было показано в предыдущем параграфе, характеризует отношение длины МЭП к размеру неравновесного слоя. Кроме того, важно отметить, что параметр P с точностью до коэффициента равен параметру P_1 , что обозначает следующее. Как только объёмное зарядообразование начинает играть ключевую роль, и размер неравновесных слоёв становится мал по сравнению с МЭП, сразу же реализуется случай сильного влияния заряда на распределение электрического поля. Параметр P_D представляет собой соотношение между диффузионным и миграционным слагаемыми, т.е., по сути, показывает роль диффузионного тока по сравнению с миграционным. В частном случае, когда можно пользоваться соотношением Эйнштейна для определения связи подвижности ионов и коэффициента диффузии (которое, вообще говоря, выводится для газов, а не для жидкостей), параметр P_D можно представить следующим образом:

$$P_D = \frac{kT/e}{U_0}$$

Соответствующее выражение представляет собой отношение диффузионного потенциала к межэлектродной разности потенциалов, и в большинстве случаев параметр P_D оказывается очень малым. Например, для напряжения 1 кВ: $P_D \approx 10^{-5}$. Этот параметр, как было показано выше, играет основную роль при рассмотрении процессов, происходящих в сильных электролитах. Стоит заметить, что если проводить более строгую оценку, то нужно учесть тот факт, что характерным пространственным масштабом изменения концентрации будет являться длина не МЭП, а неравновесного слоя. В результате оценка роли диффузии в приэлектродных областях изменится, и она будет выражаться как: P_D/P_0 (с учётом того, что P_0 как раз и показывает отношение размера неравновесного слоя к длине МЭП). Тогда для напряжения 1 кВ роль диффузии на самом деле окажется выше и будет составлять около 10^{-3} , а при напряжениях порядка 10В диффузией уже нельзя будет пренебрегать (по крайней мере, в пределах приэлектродных слоёв). Соответствующий вывод согласуется с тем, что получается и в численных экспериментах.

Проведя аналогичным образом процедуру обезразмеривания для уравнения Нернста Планка получим:

$$\frac{\partial n_+^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(n_+^* \frac{d\varphi^*}{dx^*} - P_D \frac{\partial n_+^*}{\partial x^*} \right) = P(1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.41)$$

Таким образом, учитывая что $\rho^* = n_+^* - n_-^*$, окончательно можно записать следующую систему уравнений:

$$\frac{d^2 \varphi^*}{dx^{*2}} = -(n_+^* - n_-^*) \frac{P}{2} \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial n_+^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(-n_+^* \frac{d\varphi^*}{dx^*} - P_D \frac{\partial n_+^*}{\partial x^*} \right) = P(1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial n_-^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(n_-^* \frac{d\varphi^*}{dx^*} - P_D \frac{\partial n_-^*}{\partial x^*} \right) = P(1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.44)$$

Именно в таком виде проводится численный расчёт рассматриваемой задачи, которое зависит всего от 2 безразмерных параметров: от P (т.е. от размера приэлектродного слоя) и P_D (т.е. от роли диффузии). Параметр P_D в большинстве случаев оказывается малым и, формально, им можно пренебречь. Однако численный расчёт оказывается более стабильным, когда диффузионное слагаемое не исключается из рассмотрения (при этом принципиальный расчёт в COMSOL возможен и без него). Проведём классификацию уравнений (3.65)–(3.67). (3.65) – это обыкновенное линейное неоднородное дифференциальное уравнение 2-ого порядка. (3.66) и (3.67) – это нелинейные неоднородные уравнения в частных производных второго порядка от двух аргументов с переменными коэффициентами.

Рассмотрим стационарный случай и пренебрежем диффузионным членом в уравнении Нернста-Планка. Пренебрежем также влиянием объёмного заряда. В безразмерном виде упрощённая система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{dn_+^*}{dx^*} = P(1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.45)$$

$$-\frac{dn_-^*}{dx^*} = P(1 - n_+^* n_-^*) \quad (3.46)$$

Она включает миграционный член(слева) и диссоационно-рекомбинационный член(справа). Безразмерный параметр P характеризует влияние диссоационно-рекомбинационных процессов на прохождение электрического тока. Перепишем уравнение (3.46):

$$\frac{dn_+^*}{1 - n_+^* n_-^*} = P dx^* \quad (3.47)$$

и учтём, что (согласно сделанному приближению) $n_+ + n_- = 2n_0$ или $n_+^* + n_-^* = 2$. При таком приближении получаемое аналитическое решение будет соответствовать случаю полубесконечного пространства и, соответственно, не будет учитываться граничное условие на второй границе (равенство нулю концентрации отрицательных ионов). В результате получим:

$$\frac{dn_+^*}{n_+^{*2} - 2n_+^* + 1} = P dx^* \quad (3.48)$$

Проинтегрируем (3.48):

$$\frac{-1}{n_+^* - 1} = P x^* + c \quad (3.49)$$

Используем граничное условие при $x = 0$:

$$c = 1.$$

Проводя простые преобразования, получаем:

$$n_+^* = 1 - \frac{1}{1 + Px^*} \quad (3.50)$$

Таким образом, при прохождении тока на границе электрод-слабый электролит возникает неравновесный диссоационно-рекомбинационный слой, величина P определяет толщину неравновесного слоя: чем меньше P тем толще слой и наоборот. Пример распределения безразмерной концентрации в МЭП представлен на рис.3.9 (слева), на котором представлены распределения концентраций ионов, распределение напряженности поля и интенсивности рекомбинации, на каждом графике приведено три варианта – аналитическое решение, численное решение в упрощённой (т.е. без учёта влияния заряда на напряжённость электрического поля и с уменьшенной диффузией) и полной постановках. Стоит ещё раз подчеркнуть, что в аналитическом решении не учитывается граничное условие на втором электроде (решение, формально, получено для полу бесконечного пространства), т.е. оно не описывает рост концентрации у противо электрода; поэтому на графиках представлена только левая половина МЭП.

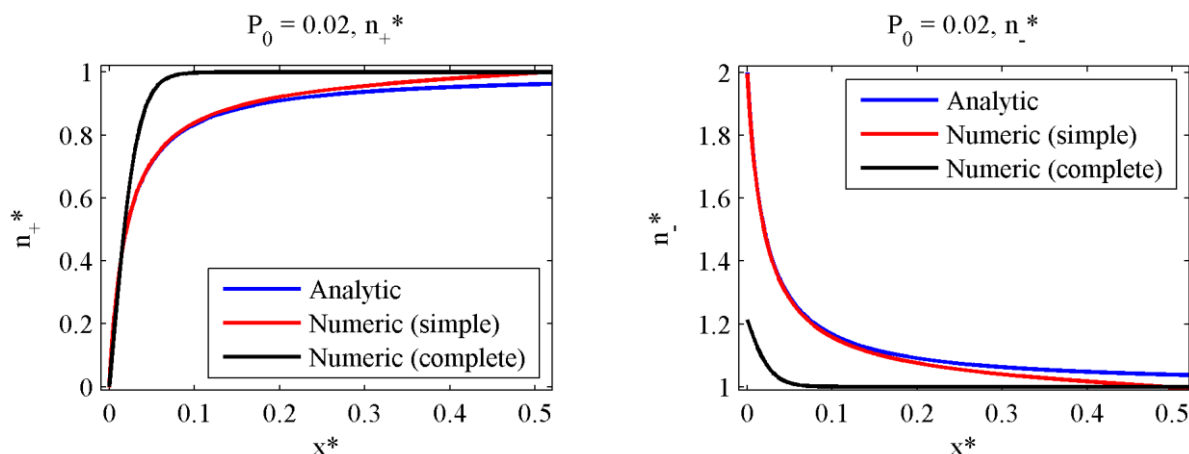


Рис. 3.9. Графики распределений безразмерных концентраций положительных (слева) и отрицательных (справа) ионов, построенные на основе аналитического решения и рассчитанные численно в упрощённой и полной постановках при $P_0 = 1/P = 0.02$.

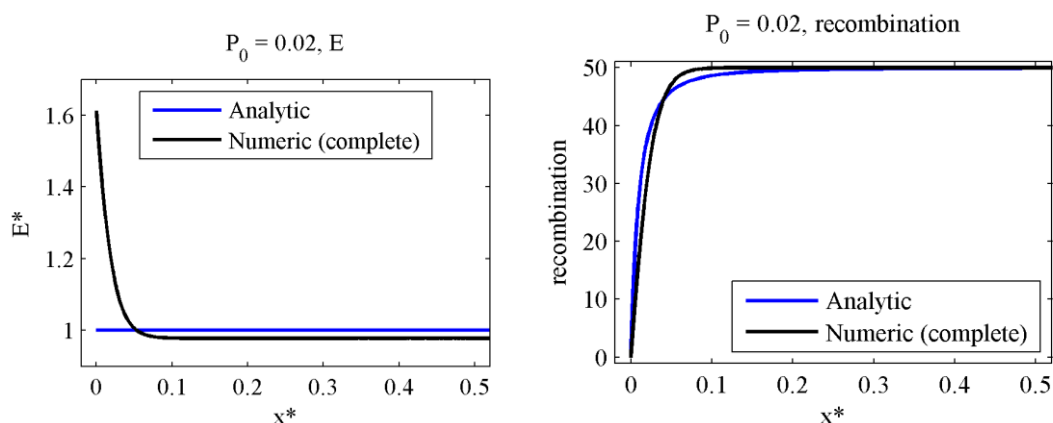


Рис. 3.10. Распределение электрического поля (слева) и интенсивности рекомбинации (справа), полученные аналитически и численно (в полной постановке) при $P_0 = 1/P = 0.02$.

Все решения описывают наличие приэлектродного диссоационно - рекомбинационного

слоя. Однако аналитическое решение, ввиду сделанного приближения про малость размера слоя по сравнению с размером МЭП, практически не отличается от численного в упрощенной постановке, небольшое различие видно на больших расстояниях. В то же время влияние объемного заряда весьма существенно, особенно на распределение электрического поля. Кратко проанализируем полученное решение. Если к ячейке не приложено напряжение, то поток ионов отсутствует, реакции диссоциации и рекомбинации находятся в равновесии, и концентрации ионов обоих сортов во всём объёме распределены однородно. При включении напряжения в объёме ячейки возникает миграционный поток ионов, обусловленный проводимостью. Однако на границе электрода поток и концентрации ионов одноимённого сорта равны нулю из-за наличия «стенки», на которой отсутствует инжекция, т.е. поверхностное зарядообразование. В результате, у электрода образуется область дефицита одноимённого заряда, которая хорошо видна на рис. 3.9 (слева). Внутри этой области происходит увеличение концентрации ионов от нулевого уровня до равновесного за счёт диссоциационного зарядообразования. Характерный размер слоя определяется, безразмерным параметром P . У отрицательных ионов у правого электрода образуется максимум рис.3.9 (справа), который обусловлен снижением интенсивности рекомбинации из-за пониженной концентрации положительных ионов.

Стоит отметить, что максимальное значение концентрации отрицательных ионов, полученное в численном решении, больше чем то, которое получено аналитически – примерно 1.2 против 2. Это объясняется тем, что в численном решении учитывается изменение напряжённости электрического поля под действием объёмного заряда, и сохранение плотности тока вдоль МЭП обеспечивается не только за счёт изменения концентрации, но и за счёт перераспределения электрического поля (рис. 3.10, слева). Таким образом, концентрация отрицательных ионов в приэлектродной области, рассчитанная численно, оказывается ниже, чем аналитически оцененное значение благодаря учёту усиления электрического поля. Изменение концентрации отрицательных ионов, получаемое при учёте влияния объёмного заряда на электрическое поле, приводит к снижению интенсивности рекомбинации (рис.3.10, справа) внутри приэлектродного слоя, что, в свою очередь, обуславливает усиление суммарной интенсивности зарядообразования. Именно это является причиной уменьшения размера приэлектродного слоя (рис. 3.9, слева) в численном решении по сравнению с приближённым аналитическим.

Результаты моделирования.

Рассмотрим типовые результаты расчёта процесса развития неравновесных процессов в полной постановке на следующем примере: $P = 5$, $k_{\pm} = 0$ (см. рис. 3.11, без инжекции).

Все величины рассчитаны и представлены на графиках в безразмерном виде. Значение полного тока «1» соответствует току, обусловливаемому ионами только одного сорта. Поэтому и ввиду того, что в модели есть два сорта ионов, начальное значение полного тока (которое также соответствует полному току проводимости) равняется «2» (при выбранных характерных значениях величин, использованных для обезразмеривания). Графики отображают динамику развития неравновесного процесса. При подаче напряжения от левого электрода движется фронт дефицита положительных ионов. По мере продвижения в объём, концентрация ионов растёт за счёт объемной диссоциации, формируя приэлектродный слой. Как и следовало ожидать, при значении безразмерного параметра исследо-

вания $P = 5$ размер диссоциационно-рекомбинационного слоя (т.е. то расстояние, на котором концентрация достигает значения 0.5) составляет примерно $0.2l_0$. Стационарные распределения устанавливаются через время, равное времени пересечения ионами межэлектродного промежутка. Около каждого электрода формируется слой дефицита одноимённого с электродом заряда, что приводит к появлению объёмного гетерозаряда. Последний, в свою очередь, влияет на распределение электрического поля, повышая его в приэлектродных областях. Причём это влияние (как и следовало из значения соответствующего безразмерного параметра $P_1 = 0,5P = 2.5$) весьма существенно и достигает 40% от среднего значения.

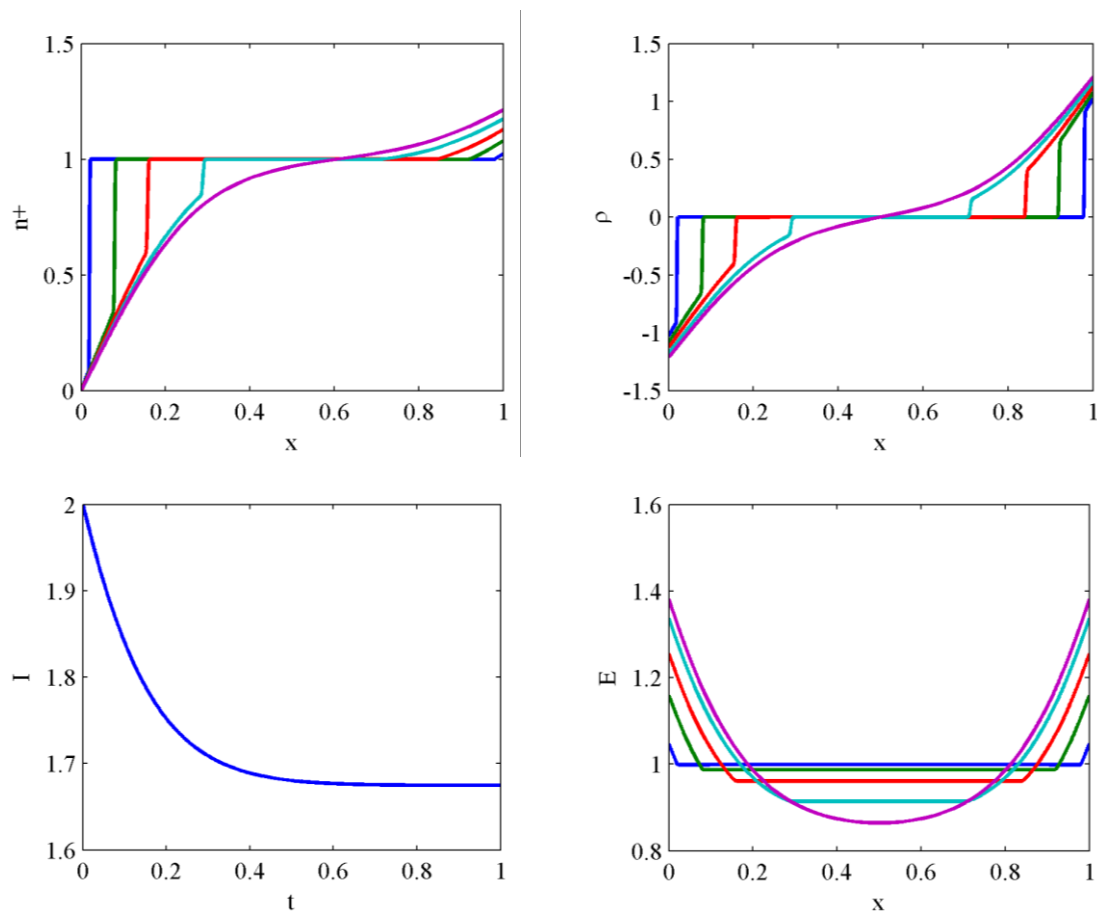


Рис.3.11. Результаты численного расчёта при $P = 5$, $k_{\pm} = 0$: сверху – распределения концентраций и объёмной плотности заряда, снизу – ампер-секундная характеристика и распределения напряжённости электрического поля.

Ниже представлен весь спектр возможных решений, которые описывается следующими значениями безразмерного параметра: $P_0 = 20, 2, 0.2, 0.02$ $P = 50, 5, 0.5$ и 0.05 при разном уровне симметричной безразмерной инжекции с обоих электродов: $k_{\pm} < 1 - 0, 0.5$ и $k_{\pm} = 20 > 1$. Поскольку параметр P определяет одновременно и относительный размер приэлектродных слоев и степень влияния объёмного заряда на электрическое поле, то при больших значениях P объёмный заряд очень сильно влияет на электрическое поле. Поэтому для обеспечения приблизительно одинаковых условий при уровнях инжекции $k_{\pm} > 1$ для каждого P_0 выбирались различные значения безразмерного тока инжекции $k = 1.2, 2.0, 5.0$ и 20 .

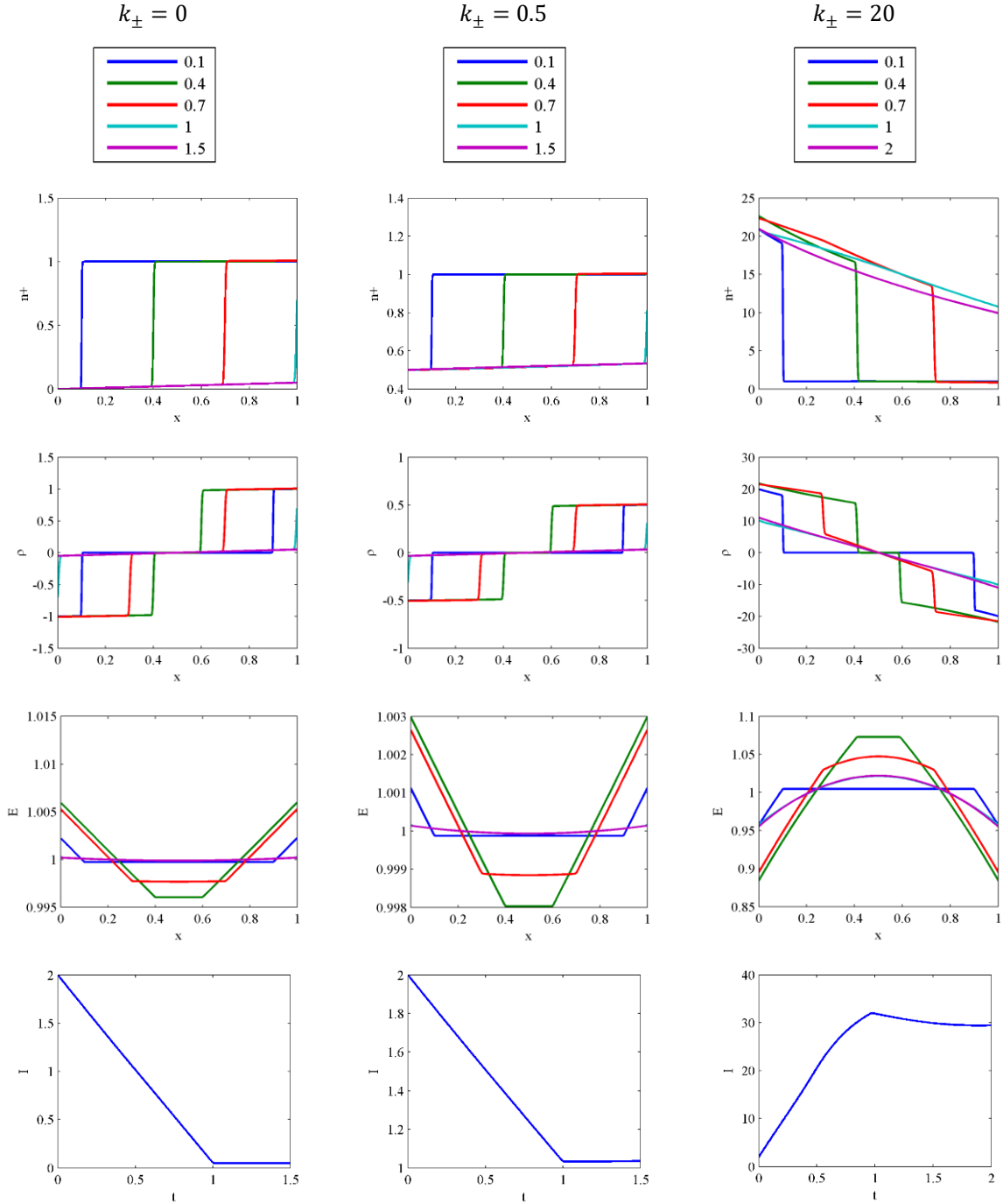


Рис. 3.12. Распределения концентрации положительных ионов, объемного заряда, напряженности поля и амперсекундные характеристики для значения $P_0 = 20$ и разной силе инжекции 0, 0,5, 20.

Как показали исследования вольтамперных характеристик многочисленных жидких диэлектриков они имеют типовой характер: линейный низковольтный участок и нелинейный(степенной) высоковольтный. Уровень собственной низковольтной проводимости очищенных жидких диэлектриков, измеренной в стандартной ячейке, лежит в диапазоне: от 0,01 пСм/м до 100нСим/м, а диапазон напряжений от 100В до 100кВ, относительная диэлектрическая проницаемость лежит в пределах 2-5. При введении в очищенный жидкий диэлектрик известных примесей характер ВАХ не изменяется, однако начальный уровень низковольтной проводимости повышается пропорционально концентрации введен-

ной примеси, а угол наклона высоковольтного участка уменьшается. Степень диссоциации введенных примесей крайне мала, судя по растворам йода она лежит на уровне 10^{-6} . Электронно-акцепторные примеси, стимулирующие рождение ионов на катоде, существенно увеличивают ток инжекции, а, следовательно, и полный ток высоковольтной проводимости, равный сумме тока проводимости и тока инжекции.

Полученные результаты дают основание получить распределения искомых функций на различных участках ВАХ, исходя из утверждения, что низковольтная проводимость жидких диэлектриков, по-видимому, определяется равновесной термической само диссоциацией примесных молекул и ионных пар, а инжекционный механизм становится существенным, начиная с некоторого порогового напряжения, причем именно инжекционный механизм определяет нелинейный ход ВАХ на высоковольтном участке. Считаем, что зависимость уровня инжекции от напряженности электрического поля известна, инжекция активируется при напряжении 1000 В (напряженности 10^4 В/м), и плотность тока инжекции сравнивается с плотностью тока проводимости ($k=1$) при более высоком напряжении.

На рисунках 3.12 приведена динамика развития неравновесного диссоационно-рекомбинационного процесса при малых плотностях тока инжекции $k=0$ и $0,5$ – а именно различные стадии распределения концентрации положительных ионов и объемного заряда. Если считать, что проводимость жидкости $0,4 \text{ пкСим/м}$, диэлектрическая проницаемость 2 , подвижность ионов $10^{-8} \text{ м}^2/\text{В с}$, $l_0 = 0,01 \text{ м}$, то при $U=1 \text{ кВ}$ параметр $P=0,05$.

Это значит, что глубина рекомбинационного слоя в 20 раз больше длины межэлектродного промежутка. В этих условиях диссоационно-рекомбинационные процессы не успевают восстановить равновесную концентрацию раствора, нарушенную миграционными процессами. При отсутствии инжекции: $k=0$, после подачи напряжения видно движение фронта дефицита коионов от положительного электрода. В результате диссоационно-рекомбинационных процессов нулевой начальный уровень концентрации положительных ионов незначительно возрастает по направлению от электрода в раствор. В установившемся режиме, остаются диссоационно-рекомбинационные слои гетерозаряда у каждого из электродов. Концентрации коионов линейно возрастают от электродов в объем от нуля до уровня $0,05 n_0$, т.е. всего до 5% от равновесного значения. Поле внутри МЭП незначительно спадает по направлению от электродов в объем, а у электродов слегка повышено. С ростом напряжения степень неоднородности поля падает. Ампер - секундная характеристика имеет линейно - ниспадающий характер, при отсутствии инжекции плотность тока спадает очень существенно, в 20 раз. Это связано с тем, что диссоциация за время пересечения ионами межэлектродного промежутка не успевает восстановить концентрации ионов к исходному равновесному уровню. Время релаксации тока равно времени пересечения фронтом ионов МЭП. Распределение концентрации ионов в межэлектродном промежутке сильно неоднородно и существенно отличается от равновесного. Поскольку низковольтная проводимость определяется равновесной концентрацией ионов, то в этих условиях её измерение по конечному уровню тока практически невозможно. Хочется обратить внимание на то, что распределение напряженности поля слабо неоднородно, а распределение концентрации ионов сильно неоднородно, т.е. нет линейной связи между напряженностью поля и плотностью тока, нарушается даже дифференциальный закон Ома. Проводимость можно определить только по начальному току, когда неравновесные процессы еще не развились. В литературе подобные процессы иногда называют электроочисткой.

При плотности тока инъекции равной половине плотности тока проводимости ($\kappa=0,5$) амплитуда фронта дефицита ионов уменьшается, уменьшается также плотность заряда в приэлектродных слоях, распределение напряженности становится более однородным, а плотность тока спадает всего в 2 раза, благодаря вкладу инъекционного тока.

При плотности тока инъекции равной плотности тока проводимости ($\kappa=1$) слои вообще не образуются, т.к. на границе равновесие, миграция ионов от границы восполняется инъекцией, объемного заряда не возникает, а распределение напряженности однородно. В этих условиях возможно измерение низковольтной проводимости.

При $\kappa>1$ картина изменяется на обратную. При напряжении выше порогового от каждого из электродов вместо фронта дефицита ионов, начинает распространяться фронт повышенной концентрации инжектированных коионов. Концентрация коионов благодаря рекомбинации со встречными ионами противоположного знака, образованными за счет диссоциации в объеме и инъекции с противоиэлектрода несколько спадает. Поэтому фронты повышенной концентрации коионов, движущиеся на фоне начального постоянного уровня низковольтной проводимости, доходят до середины МЭП, а далее их концентрации быстро спадает, образуя у каждого из электродов слои гомозаряда, под действием которых электрическое поле проваливается у электродов и повышается в середине межэлектродного промежутка.

Вольтсекундная характеристика из ниспадающей, приобретает возрастающий характер. Рост тока обусловлен повышением концентрации ионов обоих сортов за счет инъекции ионов с поверхности электродов. Однако полный ток возрастает с некоторого ненулевого значения, обусловленного начальной проводимостью жидкости. В рассмотренном примере степень инъекции велика, поэтому рост полного тока более чем в 10 раз. Зависимость полного тока от времени нелинейная, время релаксации соответствует двухкратному времени пересечения ионными фронтами межэлектродного промежутка. Начальный участок, соответствующий единице времени – возрастающий, после чего происходит небольшой спад тока, за счет рекомбинационных процессов. В этих условиях измерение низковольтной проводимости также невозможно.

Результаты моделирования при $P=0,5$ приведены на рис. 3.13. Поскольку $P = \frac{\sigma_0 L^2}{b U_0 \varepsilon \varepsilon_0}$, то этот случай соответствует например повышению на порядок низковольтной равновесной проводимости жидкости или понижению напряжения. Как видно из рис. 3.13 в целом картина аналогична рассмотренной ранее, однако влияние диссоциации более существенно, что сокращает размер приэлектродного слоя в 10 раз, т.е. до удвоенной длины МЭП. При $\kappa<1$ на фоне движения фронта дефицита коионов, видно существенное возрастание фоновой концентрации ионов, происходящей под влиянием термической диссоциации. За время продвижения фронта ионов через МЭП концентрация ионов успевает восстановиться до уровня $0,5 n_0$, т.е. в 10 раз выше, чем в предыдущем примере. Глубина спада полного тока также меньше, при $\kappa=1$ всего в 2 раза, а при $\kappa=0,5$ еще меньше.

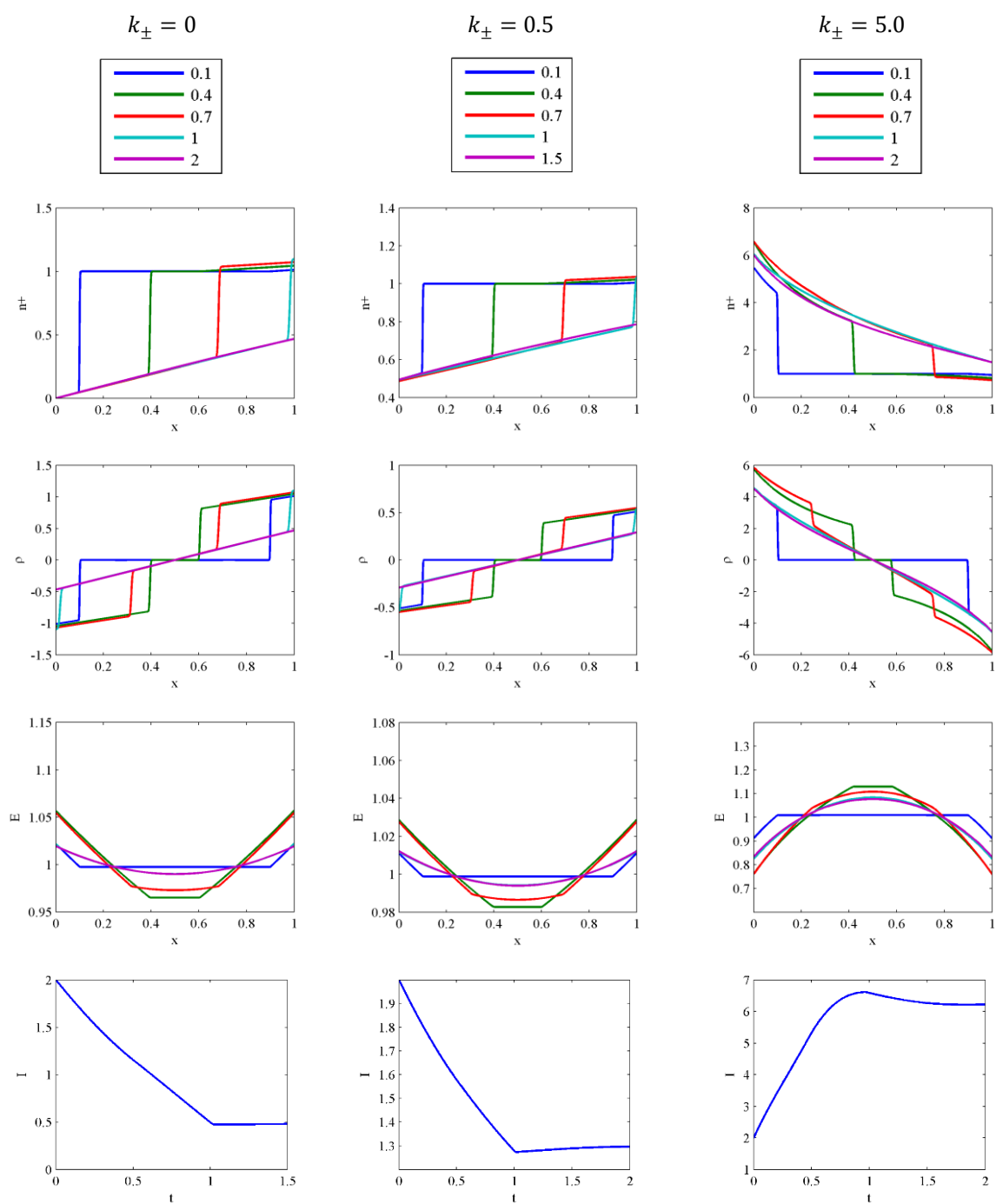


Рис.3.13. Распределения концентрации положительных ионов, объемного заряда, напряженности поля и ампер-секундные характеристики для значения $P = 0,5$ и разной силе инжекции 0, 0,5, 5.

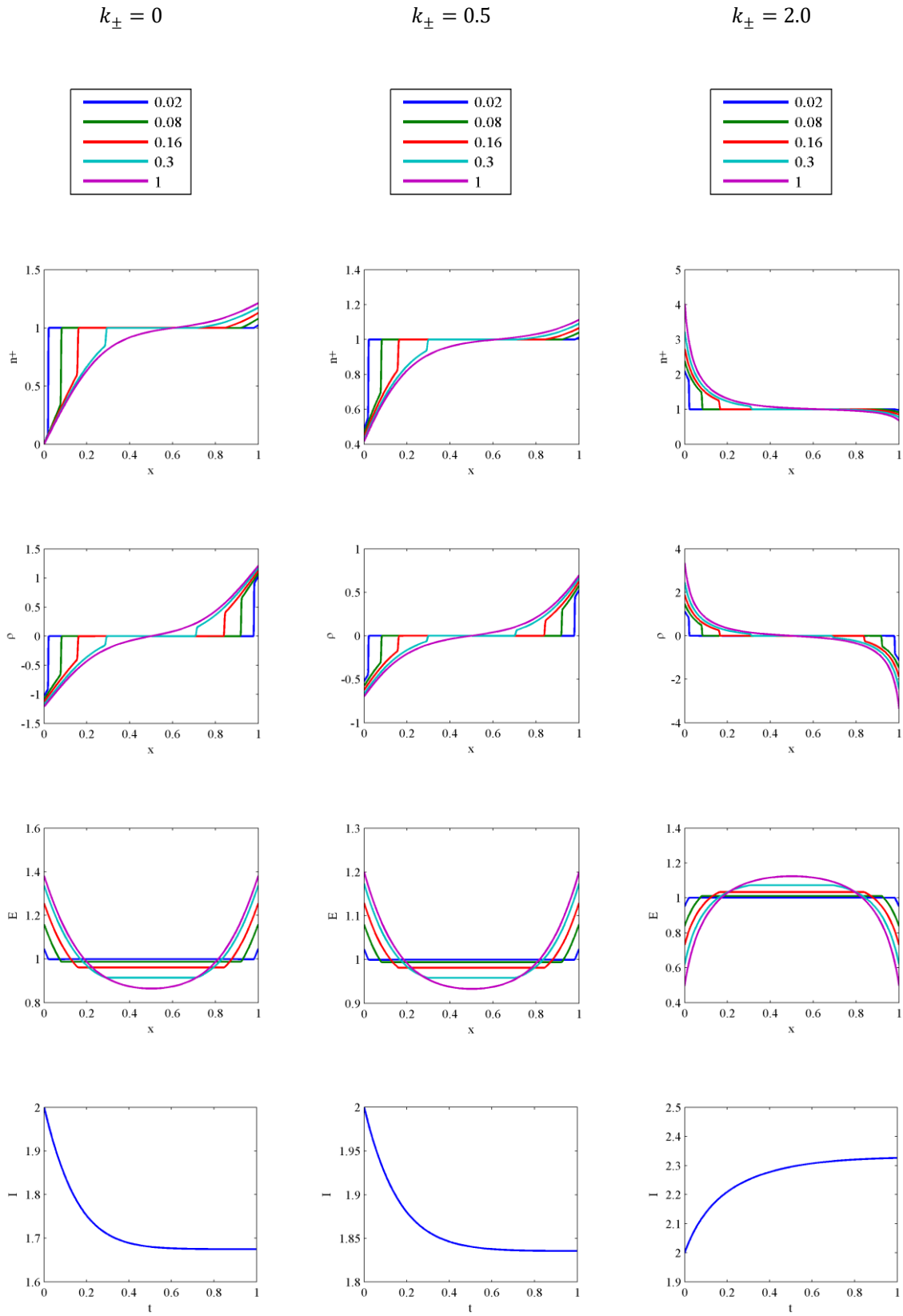


Рис. 3.14. Распределения концентрации положительных ионов, объемного заряда, напряженности поля и ампер-секундные характеристики для значения $P = 5$ и разной силе инжекции 0, 0,5,2,0.

Возрастание полного тока при $k=20$ в результате роста рекомбинационных процессов существенно меньше - менее чем в 4 раза. Однако и в этих условиях измерение низковольтной проводимости возможно только при $k=1$, когда нет нарушения равновесия диссоциационно-рекомбинационных процессов. 3. На рис.3.14 приведены результаты расчетов при $P = 5$, оценочная толщина рекомбинационного слоя 0,2. В целом картина сохраняется, однако влияние диссоционно-рекомбинационных процессов еще более значимо. Как видно из графиков для $k=0$, при движении фронта дефицита ионов от положительного электрода равновесная концентрация $n_+ = 1$ устанавливается в середине кюветы, далее наблюдается рост концентрации положительных ионов выше равновесного значения. Наблюдается существенное разделение зарядов, которые существенно, до 40%, искажают распределение электрического поля, повышая напряженность у электродов и понижая поле в середине МЭП. При $k>1$ также наблюдается значительное уменьшение амплитуды фронта инжектированных ионов к середине МЭП до равновесной концентрации с одновременным ростом начального уровня инжекции. Последний эффект объясняется ростом приэлектродной напряженности поля, а, следовательно, и плотности тока инжекции. 4. На рис.3.15 приведены распределения концентрации положительных ионов, объемного заряда, напряженности поля и ампер-секундные характеристики для значения $P = 50$ и разной силе инжекции 0, 0,5, 1,2

Расчетная толщина рекомбинационного слоя 0,02. Как видно из графиков для $k < 1$ фронт дефицита коионов выходит на равновесный уровень на глубине $0,02l_0$. Аналогично глубина проникновения инжектированного заряда при $k>1$ также менее $0,02 l_0$. Толщина приэлектродных слоев неравновесной концентрации 0,02, заряженных слоев также $0,02l_0$ и именно в этих слоях искажается электрическое поле, в остальной части МЭП поле однородно. При $k=0$ поле возрастает на 60%, а при $k<1$ поле спадает на 10%. Несмотря на существенное влияние объемного заряда, толщина рекомбинационных слоев мала, а в основной части МЭП низковольтная проводимость равна своему равновесному значению. Глубина спада полного тока при $k=0$ не выше 5%, что объясняется небольшой величиной приэлектродных слоев, невелика также степень роста полного тока при наличии инжекции, всего 2,5%. Время релаксации тока значительно меньше 1. Таким образом, при малых значениях P_0 инжектированный заряд не проникает в объем жидкости, а гибнет в пределах тонких приэлектродных слоев.

Этот вывод справедлив для неподвижной жидкости. Далее будут рассмотрены варианты решений с учетом возможных ЭГД-течений. Анализ приведенных результатов показывает, что измерение равновесной концентрации ионов, либо низковольтной проводимости жидкости представляет непростую задачу. Это связано, во-первых, с формированием диссоциационно-рекомбинационных слоев, которые могут существенно нарушить равновесное распределение концентраций ионов, а во-вторых сформировать заряженные структуры, искажающие распределение поля в ячейке. По-видимому, наилучшие результаты можно получить для $k=1$, когда пропускание тока не нарушает равновесное распределение концентрации ионов. Поскольку $P = \frac{\sigma_0 L^2}{b U_0 \epsilon \epsilon_0}$, то для измерения низковольтной проводимости (равновесной концентрации ионов), следует выбирать условия малых P , т.е. целесообразно использовать малые напряжения и большие межэлектродные расстояния.

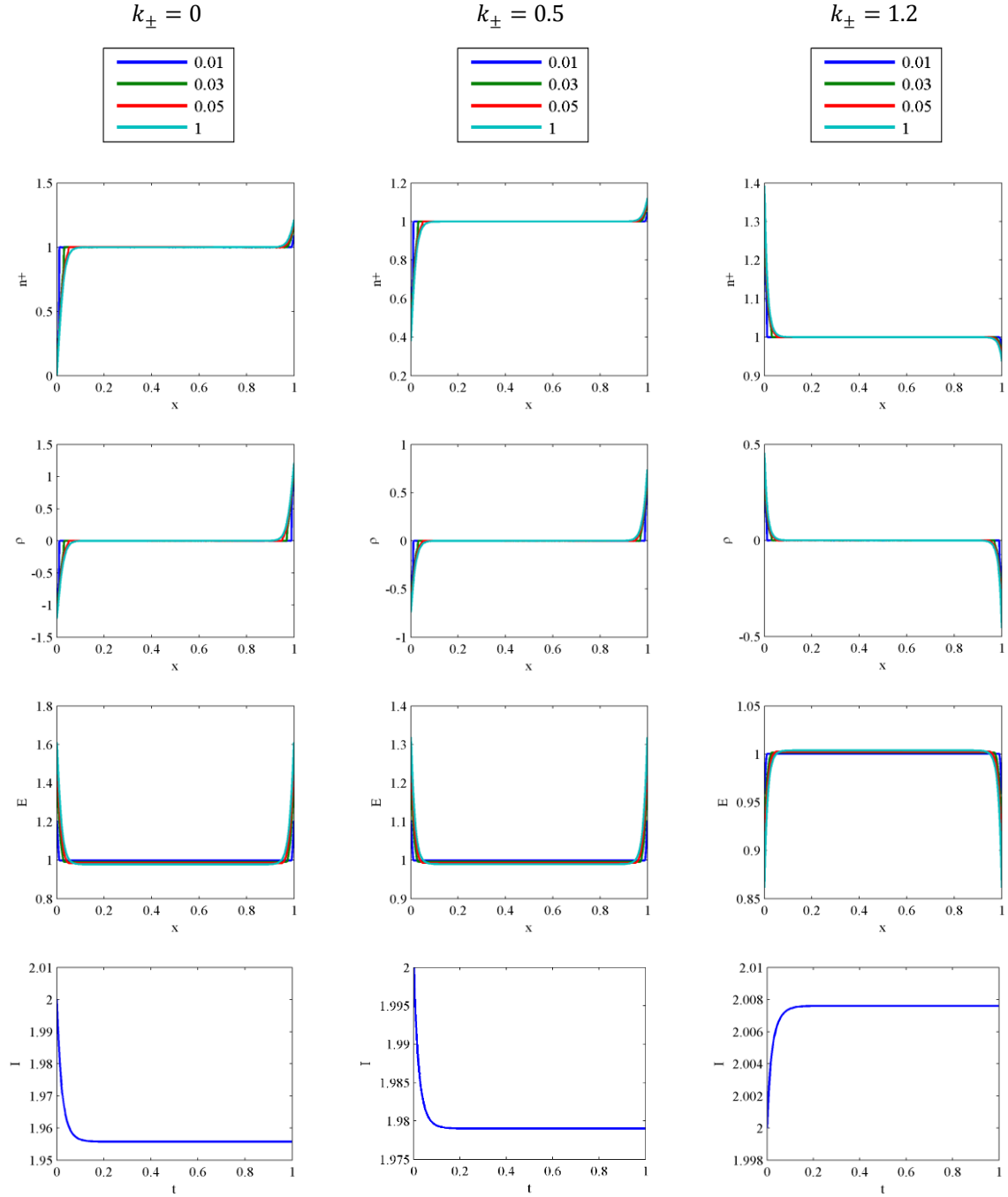


Рис. 3.15. Распределения концентрации положительных ионов, объемного заряда, напряженности поля и ампер- секундные характеристики для значения $P = 50$ и разной силе инжекции 0, 0,5, 1,2.

Инжекция в слабо проводящую жидкость

В реальных диэлектрических жидкостях инжекция осуществляется в жидкость, обладающую собственной низковольтной проводимостью. Как было установлено из исследования вольтамперных характеристик, они имеют два участка: низковольтный омический участок и высоковольтный нелинейный участок. Переход от участка низковольтной проводимости к участку высоковольтной реализуется при некотором пороговом напряжении. Это напряжение соответствует активации процесса инжекции. Ток инжекции зависит от примесей, растворенном в жидком диэлектрике и материала электродов. В главе 2 по-

казано, что при введении электроакцепторных примесей в трансформаторное масло при напряжении 1 кВ слои у отрицательного электрода вырождаются, а при повышении напряжения приобретают гомозаряд. В работе [3.22] ток инъекции от уединенного электрода исследован капельным методом. Показано, что инъекция активизируется при напряжениях порядка 1-5 кВ, соответствующих переходу из низковольтного режима ВАХ в высоковольтный и зависит от материала электрода и концентрации примесных добавок. Исследуем при помощи решения в Comsol системы уравнений Пуассона-Нернста-Планка участок, соответствующий переходу из режима низковольтной проводимости в режим высоковольтной проводимости, используя модель инъекции в жидкость с фиксированным уровнем равновесной низковольтной проводимости 10^{-10} См/м.

Рассмотрим три задачи: 1 – безразмерная плотность тока на электродах $K = 0,8$, 2 – $K=1$, 3 – $K=1,2$, напряжение 5 кВ, $P=5$.

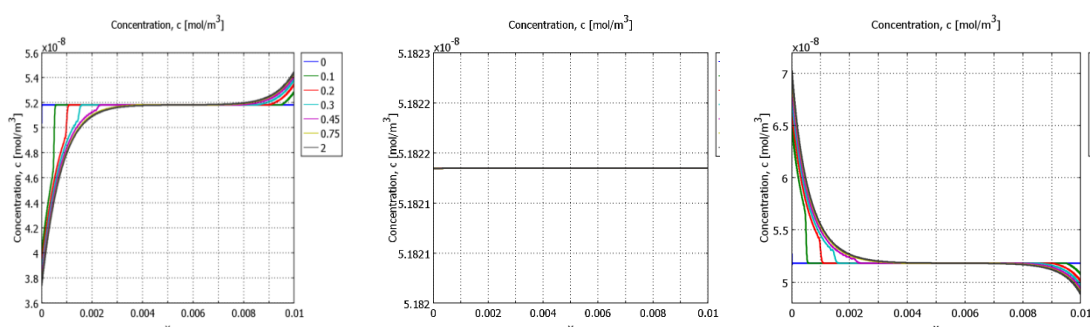


Рис.3.16. Распределение парциальной плотности заряда положительных ионов при безразмерной плотности тока инъекции: 0,8(слева), 1(в середине) и 1,2(справа).

Если плотности токов инъекции выше плотности токов проводимости ($K > 1$), то ситуация качественно изменяется: в жидкость от электродов двигаются фронты повышенной концентрации коионов, однако амплитуда фронтов быстро падает из-за рекомбинации с равновесными противоионами. В этом случае в приэлектродных областях формируются гомозарядные инъекционно-рекомбинационные слои, снижающие напряженность электрического поля у электродов и повышающие ее в середине МЭП.

Таким образом, глубина проникновения инжектированных ионов в межэлектродный промежуток, как и в предыдущем случае зависит от величины безразмерного параметра P . Поэтому глубина проникновения инжектированных ионов уменьшается с ростом низковольтной проводимости жидкости. Поскольку единица измерения тока $j = \epsilon_0 U$ пропорциональна равновесной концентрации ионов, то ток инъекции, соответствующий единичному безразмерному току K , в жидкостях повышенной проводимости также увеличивается пропорционально проводимости.

Анализируя инъекционный и неравновесный диссоционный механизмы появления ионов, можно выделить характерные черты каждого из них. Инъекционный механизм вызывает появление и движение в объеме жидкости встречных фронтов повышенной концентрации ионов, рождающихся в приэлектродных реакциях. При этом ток через жидкость возрастает, а возрастающая ампер-секундная характеристика системы выходит на стационар за время, равное времени релаксации. Рекомбинация существенна при сильной инъекции и вызывает появление в жидкости инъекционно-рекомбинационных слоев гомозаряда, приводящих к неоднородному распределению электрического поля в ячейке с

плоскими электродами. Характерное распределение электрического поля имеет максимум внутри МЭП и минимумы у электродов. Подобные неравновесные структуры, соответствующие пороговому напряжению, были экспериментально обнаружены и проанализированы в работах [3, 19-21]. На распределениях электрического поля, приведенных в этих работах, при напряжениях близких к пороговому видны три характерных случая, соответствующих $K < 1$, $K = 1$ и $K > 1$.

Влияние скорости гибели ионов на структуру рекомбинационных слоев.

В предшествующих примерах считалось, что ионы гибнут на поверхности электродов беспрепятственно. Это условия выполняется не всегда. Скорость гибели ионов может оказаться замедленной, и в этом случае у электродов будут также накапливаться ионы, противоположного с электродом знака, образуя заряженные слои диффузионной природы. Поэтому в следующем примере рассмотрим структуру рекомбинационных гетерослоев при уменьшенном в 10 раз коэффициенте гибели ионов.

Результаты расчета для проводимости $10^{-11} \text{ 1/(Ом}\cdot\text{м)}$, биполярной инжекции $8 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$ и коэффициента гибели $D = 0.1 bE$ (на обоих электродах).

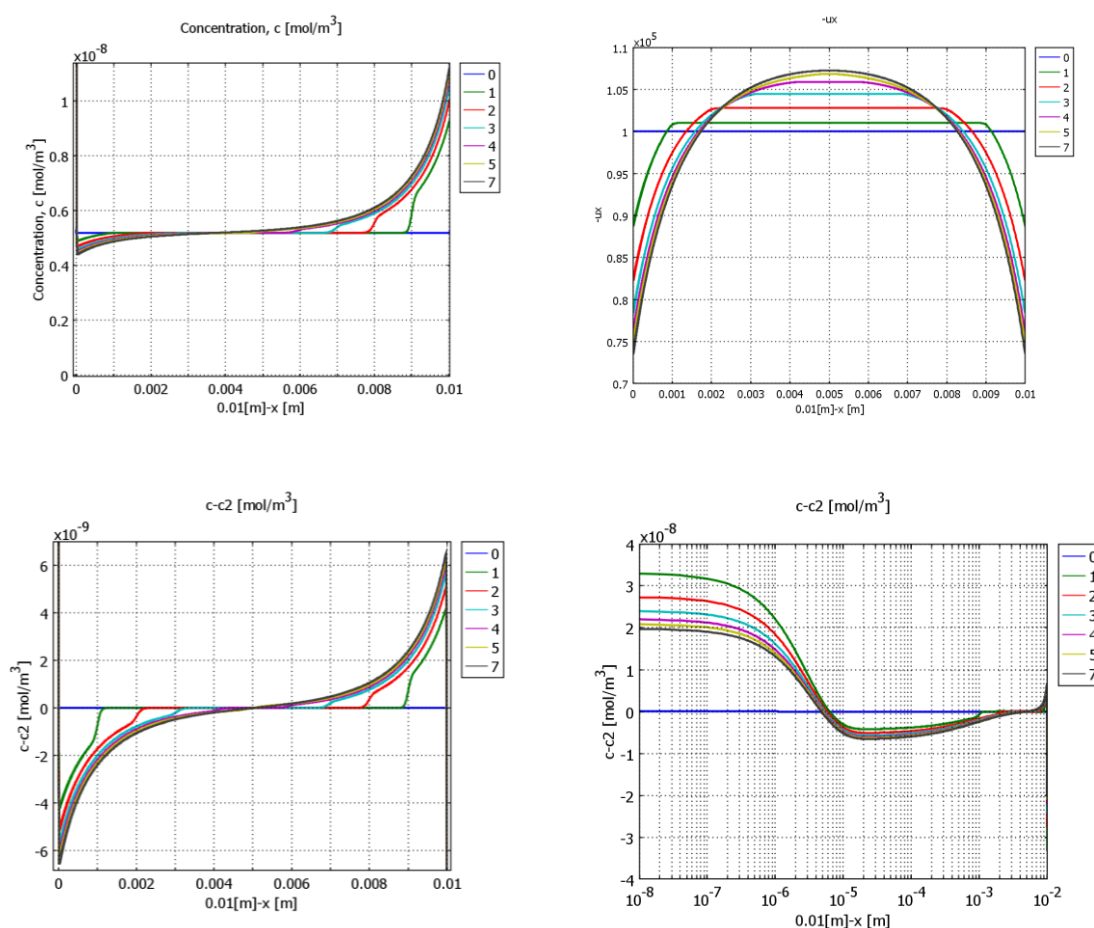


Рис. 3.17. Сверху слева – распределение парциальной плотности заряда положительных ионов, сверху справа – распределение напряжённости электрического поля в разные моменты времени, снизу слева – распределение парциальной плотности заряда положительных ионов в логарифмическом масштабе по оси “ x ”, снизу справа – распределение суммарной плотности заряда.

Как видно из результатов, приведенных на рис. 3.17 картина формирования рекомбинационных диссоционно-рекомбинационных слоев практически не изменилась. Однако уменьшение коэффициента гибели ионов привело к формированию непосредственно у поверхности электродов очень тонких диффузионных слоев гетерозаряда. При этом структура внешних более толстых рекомбинационных слоев гомозаряда осталась практически неизменной. На рис. 3.17 (внизу справа) приведена общая структура приэлектродных слоев в би логарифмическом масштабе. Это позволило рассмотреть тонкую биполярную структуру приэлектродных слоев: непосредственно к поверхности катода примыкает диффузионный слой отрицательного гетерозаряда, обусловленный пониженным коэффициентом гибели, толщина слоя 50 мкм, а далее простирается более протяженный диссоционно-рекомбинационный слой гомозаряда, толщиной 2-3 мм. Возникновение нового диффузионного слоя, связанного с пониженной скоростью гибели ионов, практически не повлияло на распределение напряженности поля и структуру рекомбинационного слоя, т.к. толщина диффузионного слоя очень мала.

Выводы.

1. Протекание электрического тока в слабо проводящих жидкостях с малым коэффициентом диссоциации примесей сопровождается формированием приэлектродных слоев объемного электрического заряда. Механизм образования объемного заряда носит неравновесный диссоциационно-рекомбинационный характер на низковольтном и ионизационно-рекомбинационный характер на высоковольтном участке ВАХ. Знак возникающего объемного заряда также зависит от приложенного напряжения.
2. В области низких напряжений, менее 1000 В, когда инжекция отсутствует, в приэлектродных диссоциационно-рекомбинационных слоях формируется гетерозаряд. Толщина рекомбинационных слоев зависит от начальной концентрации ионов в жидкости и определяется величиной безразмерного параметра P , равного отношению времени Максвелловской релаксации к времени пересечения ионами межэлектродного промежутка l/bE . При $P \ll 1$ рекомбинационные слои не успевают сформироваться и рекомбинационный объемный заряд практически не возникает, при $P \gg 1$ толщина диссоциационно-рекомбинационных слоев много меньше размеров межэлектродного промежутка. При $P = 1$ размеры рекомбинационных слоев соответствуют размерам межэлектродного промежутка и рекомбинационный эффект наиболее выраженный.
3. В области высоких напряжений, превышающих пороговое, когда плотность тока инжекция начинает преобладать над плотностью тока проводимости протекание тока сопровождается формированием ионизационно-рекомбинационных слоев гомозаряда. Толщина этих слоев также определяется безразмерным параметром P , однако парциальная плотность заряда ρ в этом случае определяется плотностью тока инжекции, пропорционального приэлектродной напряженности поля.
4. Инжекционный механизм поверхностного зарядообразования определяет высоковольтный нелинейный участок вольтамперной характеристики даже в однородном электрическом поле.
5. Уровень инжектированного заряда определяется безразмерным параметром инжекции, также равным P . При $P > 1$, инжекция существенна и влияет на распределение электрического поля в межэлектродном промежутке: электрическое поле понижено в приэлектродных областях и повышено в середине межэлектродного промежутка.
6. Снижение коэффициентов гибели ионов на электродах приводит к формированию

тонких (1-10мкм) приэлектродных диффузных слоев, практически не влияющих на структуру рекомбинационных слоев и распределение электрического поля в межэлектродном промежутке.

Экспериментальные исследования объемного заряда в жидких диэлектриках.

В настоящее время известно несколько методов обнаружения и исследования объемного заряда в диэлектрических жидкостях. Это прямые методы, связанные с взятием проб жидкости и измерением ее заряда и косвенные, связанные с измерением распределений напряженности поля и потенциала. Рассмотрим некоторые из них.

Зондовые исследования [3.19-21].

Для повышения точности измерений локальной разности потенциалов на малых базовых расстояниях был разработан и использован дифференциальный зондовый метод [3.19] (рис. 3.18). Как мы уже отмечали сравнительно малая точность обычных зондовых методов была обусловлена тем, что мы были вынуждены измерять локальные изменения потенциала на базовых расстояниях менее чем $0,1 l_0$ при помощи прибора с пределом измерения, соответствующего разности потенциалов между электродами. Для устранения указанного недостатка нами введен в компенсационную схему измерений дополнительный электростатический вольтметр С-50, включенный между зондом (3) и компенсационным источником питания Б5-32. Введение этого вольтметра (предел измерения 75 В), используемого в качестве нуль-инструмента, позволяет существенно повысить точность получаемых данных. Напряжение компенсационного источника питания измеряется при помощи цифрового шестизначного вольтметра постоянного тока, типа В7-23.

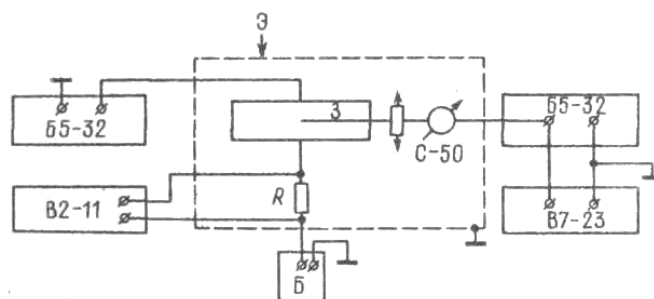


Рис. 3.18. Блок схема установки по исследованию распределения потенциала зондовым методом.

При измерениях до порога возникновения течений мелкомасштабные временные флуктуации показаний зонда практически не возникали; в послепороговой области возникающие флуктуации учитывались при определении погрешности измерений. Для снижения флуктуации внешнего и компенсационного напряжений в экспериментах использовались сухие батареи типа 315ПМЦГ-80, а также высокостабилизированные источники питания типа Б5-32. Точность отсчета перемещения зонда при движении его в одном направлении от нижнего электрода (или к нижнему электроду) определяется точностью стрелочной микрометрической головки и составляет 5 мкм. Положение, соответствующее разрыву контакта зонда с поверхностью нижнего электрода, регистрировалось точностью ± 5 мкм.

Исследование тонкой структуры неравновесных приэлектродных слоев.

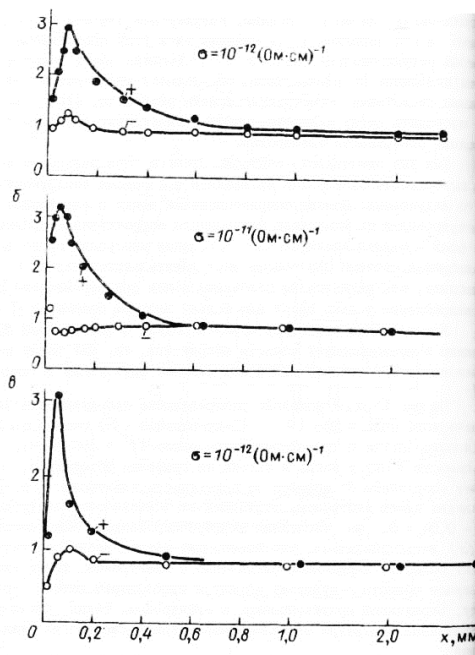


Рис. 3.19 Распределение напряженности поля в приэлектродной области.

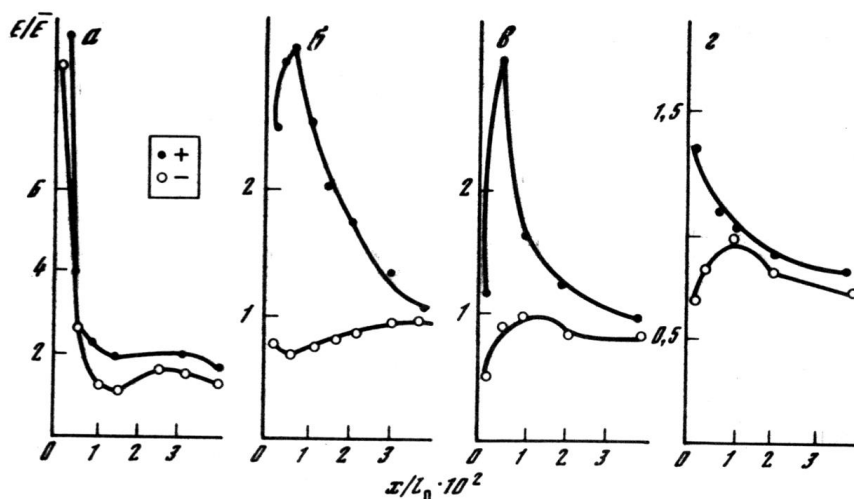


Рис.3.20. Распределения напряженности поля в растворах йода в трансмасле.

На рис. 3.20 приведено распределение электрического поля в растворе йода в трансформаторном масле при средней напряженности поля $E = 1$ кВ/см, близкой к порогу возникновения инжекции. Видно, что в приэлектродных областях регистрируются области неоднородности электрического поля, связанные с возникновением неравновесных инжекционно-рекомбинационных слоев. Следует отметить, что распределения резко асимметрично по отношению к полярности электрода: у отрицательного электрода величина горба напряженности в несколько раз меньше, чем у положительного. Это объясняется наличием в жидкости электронно-акцепторной примеси йода, повышающей плотность тока инжекции у отрицательного электрода. Поэтому у положительного электрода плотность инжекционного тока ниже, чем у отрицательного. Поэтому у положительного электрода коэффициент $K < 1$, а у отрицательного электрода $K = 1$. Зависимости $E(x)$ у анода и

катода на графиках объединены, отсчет координаты x ведется от поверхности электрода. Распределения имеют экстремум, отстоящий от поверхности электрода на расстояние $x=0,06$ мм. Численным дифференцированием зависимостей $E(x)$ легко убедиться, что восходящие ветви кривых соответствуют области, заряженной одноименно с электродом, точки экстремумов области - нулевому заряду и ниспадающие ветви - области, заряженной противоположно с электродом. Такая биполярно заряженная структура оказалась характерной для многих жидкостей. Распределение потенциала поля у разнополярных электродов существенно различно, пик напряженности поля у анода значительно меньше, чем у катода, а в наиболее концентрированном растворе у катода регистрируется не горб, а ямка в распределении напряженности поля $E(x)$. Эти особенности находят непротиворечивое объяснение с позиций ионизационно-рекомбинационных слоев. Поскольку йод обладает выраженными электронно-акцепторными свойствами то в пред пороговой области напряжений наблюдается выраженная асимметрия в распределении поля у разных электродов: гомозаряд в жидкость инжектируется преимущественно с катода. Поэтому у катода рекомбинационный слой практически вырожден, а у анода степень вырождения слоя существенно меньше. Степень вырождения слоя растет с повышением концентрации йода.

В растворах йода приэлектродные слои удастся визуализировать, так как они окрашены в фиолетовый цвет. Поскольку коэффициент диссоциации молекул йода очень мал (10^{-6}), то цвет жидкости определяется йодом, присутствующим в растворе в молекулярном виде. Известно также, что ионы моно йодида бесцветны. Наблюдения показали, что при прохождении электрического тока через раствор йода в трансформаторном масле концентрацией 1^{-3} г/см³ первоначально однородная окраска жидкости изменяется у отрицательного электрода, с течением времени появляется тонкий просветленный слой. Это обусловлено ионизацией молекулярного йода на поверхности катода: $I_2 + 2e \rightarrow 2I^-$. Просветленный слой хорошо наблюдается в режиме ЭГД-течения при системе электродов проволочка - плоскость. Причем тогда, когда катодом является тонкий цилиндр (проволочка), струйка просветленной жидкости сносится течением в межэлектродный промежуток.

Исследование объемного заряда в слабо проводящих жидкостях капельным методом [3.11, 3.22, 3.23].

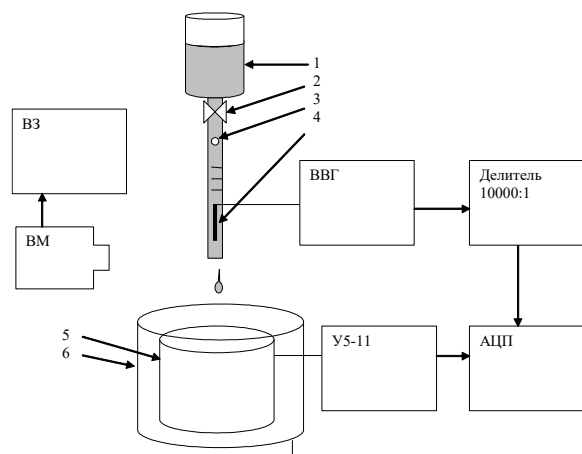


Рис. 3.21. Измерительная схема установки.

Капельный метод исследования объемного заряда жидких диэлектриков, разработанный автором, позволяет проводить исследование интенсивности инжекции (поверхностного зарядообразования) на поверхности уединенного электрода и зависимости интенсивности инжекции от напряжения для различных материалов электрода при различных скоростях оттока жидкости из приэлектродной области. Имеются две модификации капельного метода: первая позволяет забирать пробы заряженной жидкости из объема межэлектродного промежутка и измерять распределение объемного заряда в межэлектродной области, вторая позволяет измерять скорость образования заряда непосредственно у поверх-

ности «инжектирующего» электрода. Различаются они способом размещения заборного капилляра.

На рис.3.21 приведена схема установки для исследования поверхностного зарядообразования на уединенном цилиндрическом электроде. Жидкость (в данном случае – трансформаторное масло) поступает под действием силы тяжести из сосуда (1, рис.3.21) по капилляру, в котором размещен исследуемый электрод. Скорость протекания жидкости регулируется прижимным механизмом (краном 2). Жидкость, протекая вдоль электрода (4), подключенного к высоковольтному генератору, заряжается и вытекает из капилляра в виде отдельных заряженных капель. Капли заряженной жидкости падают в металлическую измерительную чашу (5), за экранированную другим металлическим экраном - емкостью (6). Металлическая чашка (5) электрически соединена с входом электрометрического усилителя напряжения постоянного тока У5-11. Выходной сигнал с усилителя подается на АЦП компьютера.

Для определения скорости истечения жидкости на капилляр нанесены метки через 1 см, диаметр капилляра составляет 2.85 мм. Помещая в капилляр пузырек воздуха (3) можно измерить скорость истечения жидкости из этого капилляра, наблюдая за временем движения метки вдоль капилляра, а также объем отдельной капли истекающей жидкости производится путем анализа ее видеоизображения (см. рис.3.22). По полученным данным строятся зависимости плотности объемного заряда в около электродном промежутке при различных напряжениях на электроде и различных расходах жидкости.

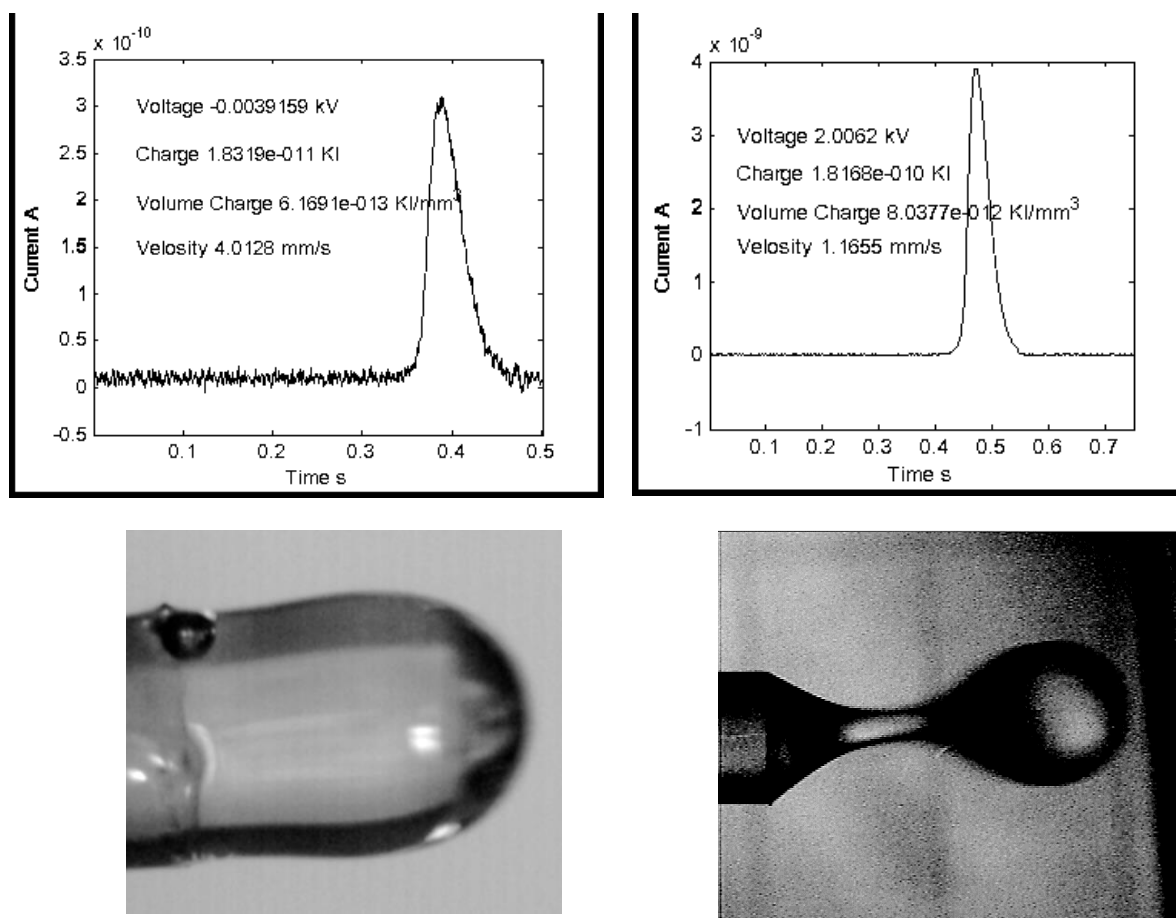


Рис.3.22 Осциллограммы тока индивидуальной капли (вверху) и фотографии заряженных капель(внизу).

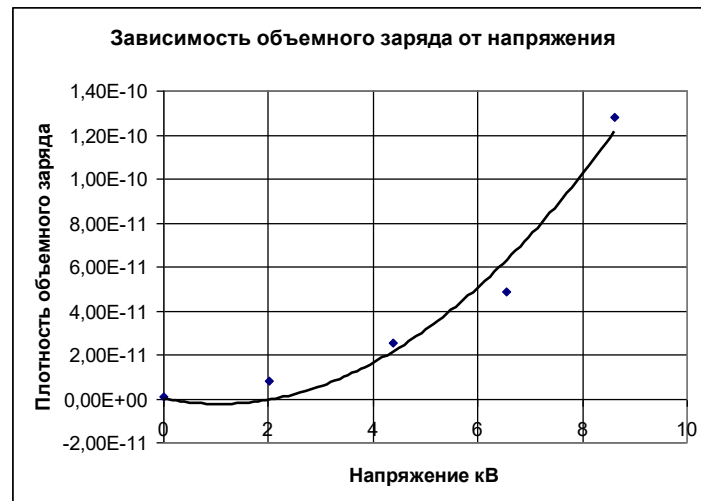


Рис. 3.23 Зависимость плотности объемного заряда от напряжения.

На рис. 3.23 приведена для примера типовая зависимость плотности объемного заряда [Кул/мм³], образующегося на поверхности медного электрода в трансформаторном масле от напряжения. Подобные зависимости исследованы в различных жидкостях и электродами, изготовленными из различных материалов [3.23, 3.24). Они позволяют исследовать процессы инжекции, происходящие на поверхности уединенных электродов

Исследование заряда приэлектродных слоев при плоской геометрии электродов.

Современная аппаратура позволяет измерять распределение объемного заряда в жидкости непосредственно путем взятия пробы из межэлектродного промежутка с последующим измерением заряда этой пробы. Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 3.24. Электроды 1, соединенные с высоковольтным источником питания 4, размещены в кювете 2 и перемещаются относительно прободоотборника при помощи координатного

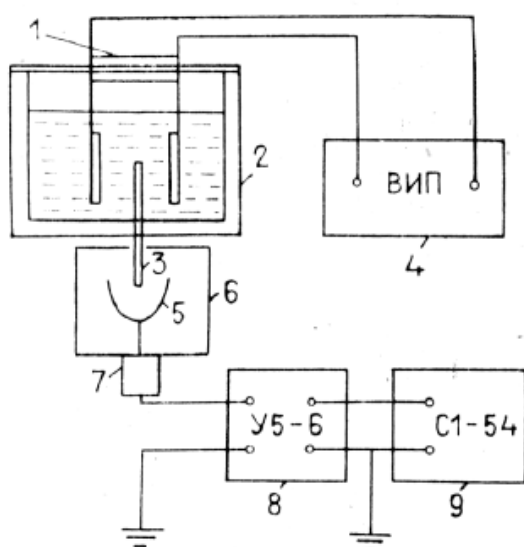


Рис. 3.24. Блок-схема измерительной установки.

Прободоотборник 3 представляет собой тонкий капилляр из полиэтилена проводимостью порядка 10^{-18} См/м, неподвижно укрепленный в две кюветы. Исследуемая жидкость под действием силы тяжести вытекает из капилляра в виде отдельных капель. Капли заряженной жидкости падают в металлическую чашку 5, заэкранированную латунной сеткой 6 и электрически соединенную со входом выносного блока 7 электрометрического усилителя 8. Выходной сигнал с усилителя 8 подается на вход осциллографа 9. Вместо осциллографа в некоторых случаях использовался АЦП и компьютер. Таким образом, осуществляется измерение заряда любой достаточно малой области межэлектродного промежутка. При падении капли заряженной жидкости в

измерительную чашку 5, в цепи усилителя 8 возникает импульс тока, который выводится на экран осциллографа 9. Форма импульса представляет собой возрастающую и ниспадающую ветви экспоненты, отражающие процессы заряда и разряда входной емкости прибора. Заряд капли определяется путем интегрирования зависимости тока от времени. С целью выявления и устранения возможных систематических погрешностей эксперимента проводилась калибровка установки при помощи металлических шариков известного.

Шарики заряжались от эталонного источника напряжения до определенного потенциала, т.е. получали известный заряд $q = CU$, где C - емкость шарика. Этот заряд измерялся установкой. Результаты измерений сопоставлялись с расчетными. Систематическая погрешность калибровки не превышала 10%. Исследования проведены в кювете с плоскими медными пластинами размерами $7 \times 10 \text{ см}^2$, при межэлектродном расстоянии 2,2 см, в смесях трансформаторного масла очищенного с бутанолом. Для каждой исследуемой жидкости подробно изучены распределения объемного заряда у поверхности каждого из электродов.

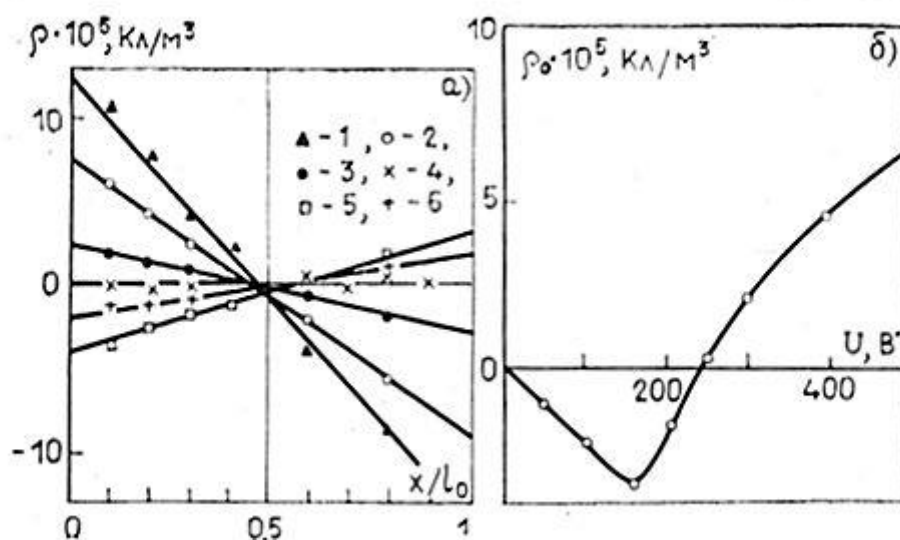


Рис. 3.25. Распределение объемного электрического заряда вдоль оси x , нормальной к плоскости электродов при различных напряжениях (а) и зависимость плотности заряда у анода от напряжения для жидкости (10% БС, 10^{-9} См/м) (б); значения напряжения на рис. 2а, кВ: 1 – 1, 2 – 0,6, 3 – 0,3, 4 – 0,24, 5 – 0,15, 6 – 0, диаметра.

На рис.3.25а приведены распределения объемного заряда вдоль оси, нормальной к плоскости электродов, в диапазоне напряжений 0,1 – 1 кВ. Начало координат соответствует аноду. Характер распределений зависит от напряжения: в диапазоне 100-300В в жидкости имеется заряд, противоположный электроду – гетерозаряд, при более высоких напряжениях знак заряда изменяется на обратный: у анода положительный у катода – отрицательный. При напряжении около 300 В заряд в жидкости исчезает. Зависимость плотности объемного заряда у поверхности положительного электрода приведена на рис. 3.25 (справа). На начальном участке плотность гетерозаряда растет, а затем начинает падать и меняет знак при напряжении 300В. Далее плотность гомозаряда монотонно возрастает. Эти распределения качественно соответствуют распределения показанным на рис. 3.16 при разных уровнях тока инжекции: распределения в диапазоне 100-200В – соответствуют рекомбинационным слоям при $K < 1$, распределения при напряжении 300 В, соответствуют $K = 1$, а распределения выше 300 В диапазону $K > 1$. Подобные измерения позволяют устано-

вить переход из режима неравновесных диссоационно-рекомбинационных слоев в режим инжекционно-рекомбинационных слоев.

Выводы.

В жидких диэлектриках возможны пять основных механизмов формирования объемного заряда:

1. Электролитический (диффузный) механизм. Этот механизм обусловлен появлением неоднородного распределения концентрации ионов при протекании электрического тока и является основным в сильных электролитах.
2. Двойные приэлектродные слои. Возникают в результате самопроизвольного обмена ионами между электродом и жидкостью. Этот механизм связан со взаимодействием молекул жидкости и материала электрода.
3. Неравновесный диссоационно-рекомбинационный механизм. Этот механизм является основным в классе слабых электролитов, к числу которых относятся жидкие диэлектрики. Механизм обусловлен нарушением равновесия между процессами локальной диссоциации и рекомбинации ионообразующих молекул, при протекании в жидкости электрического тока.
4. Инжекционный механизм. Механизм связан с приэлектродным образованием ионов из примесных молекул. Этот механизм наиболее активно проявляется в жидких диэлектриках с относительно малым уровнем собственной проводимости и наличием в жидкости электронно-акцепторной(донорной) примеси.
5. Электрокондуктивный механизм. Этот механизм связан с появлением в жидкости зон повышенной проводимости. Причиной появления этих зон может служить эффект Вина, либо локальный нагрев жидкости протекающим электрическим током.
6. Зарядовые структуры, соответствующие неравновесному диссоационно-рекомбинационному механизму обнаружены в жидких диэлектриках различными методами: зондовым, капельным, методом ампер секундных характеристик.
7. Появление в жидкости объемного заряда, вызванного инжекционным и электрокондуктивным механизмами, вызывает активную передачу импульса от зараженных ионов нейтральным молекулам жидкости, что вызывает интенсивные электрогидродинамические течения. Результаты экспериментального исследования ЭГД-течений приведены в главе 4.
8. Неравновесные диссоационно-рекомбинационные процессы нарушают линейную связь между напряженностью поля и плотностью тока и затрудняют измерение низковольтной проводимости жидких диэлектриков. Измерение последней, необходимо производить в особых условиях.

Литература к главе 3.

- 3.1 Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1979. 320 с.
- 3.2 Стишков Ю.К. Некоторые вопросы теории постоянного тока в электролитах при окислительно-восстановительных электродах //Электронная обработка материалов. 1971. №2, с.52-56.
- 3.3 Стишков Ю.К. Электрогидродинамическая модель проводимости изолирующих жидкостей: Автореф. канд. дис. Л., 1971. 12 с.
- 3.4 Стишков Ю.К. Электрогидродинамическая модель проводимости изолирующих

- жидкостей // Электронная обработка материалов, 1973. №5, с.62-65.
- 3.5 Стишков Ю.К., Казацкая Л.С. Высоковольтная поляризация с позиции ионной проводимости электроизолирующих жидкостей// Электронная обработка материалов. 1974. №4, с.29-33.
 - 3.6 Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высш. шк., 1984. 519 с.
 - 3.7 Стишков Ю.К. Электрокондуктивная конвекция в слабопроводящих жидкостях // Электронная обработка материалов. 1975. №4, с.29-33.
 - 3.8 Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972. 296 с.
 - 3.9 Самусенко А.В., Стишков Ю.К. Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей, Учебно-методическое пособие. НОЦ Электрофизика, Санкт Петербург, 2012, 649с.
 - 3.10 Стишков Ю.К. Особенности концентрационной диффузии в жидких ионных проводниках // Тез.докл. 8-го Рижского совещ. по магнитной гидродинамике. Рига. 1975. Т.1.
 - 3.11 Стишков Ю.К., Шапошников А. М., Афанасьев С.Б., Елагин И.А. Электрофизические процессы в жидкостях и газах (Учебно-методическое пособие), СПбГУ, С-Петербург, 2007г, 411с.
 - 3.12 Блощицын В.В., Стишков Ю.К., Шапошников А.М. Моделирование процессов ионной проводимости многокомпонентных слабопроводящих сред в matlab // Вестник санкт-петербургского университета. серия 10: прикладная математика, информатика, процессы управления, 2008. – № 3. –Р. 114-120
 - 3.13 V. Bloshchitsyn, A. Shaposhnikov, Y. K. Stishkov Modeling of dielectric liquids with low conductivity // Dielectric Liquids (ICDL), 2008 IEEE International Conference on – Poitiers (France), – 2008. – P. 103-105
 - 3.14 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Неравновесные механизмы формирования приэлектродных заряженных слоёв в слабых электролитах при воздействии постоянного напряжения // Сборник докладов XI Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики", Санкт-Петербург (Россия), 29 июня – 3 июля 2015, 2015. – С. 211-215
 - 3.15 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Компьютерное моделирование приэлектродных диссоциационно-рекомбинационных слоёв // Сборник научных трудов IV всероссийской научной конференции «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» – г. г. Ставрополь, – 2013. – С. 215-221
 - 3.16 Yu. K. Stishkov, V. A. Chirkov Structure of the near-electrode dissociation-recombination charged layers at various low-voltage conductivities of a low-conducting liquid // Technical Physics, 2013. – Vol. 58, – № 12. – P. 1822-1830
 - 3.17 Семенихин Н.М., Жолковский Э.К. // Электрохимия. 1982. Вып. 18. № 5. С. 691–695.
 - 3.18 Polyansky V.A., Pankrat'eva I.L ON IONIZATION OF ELECTRONICALLY EXCITED MOLECULES IN HYDROCARBON COMBUSTION UNDER STRONG ELECTRIC FIELD Journal of Electrostatics. 2012. T. 70. № 2. С. 201-206.
 - 3.19 Рычков Ю.М., Стишков Ю.К. Напряженность электрического поля и объемный заряд в технических жидких диэлектриках // Коллоидный журнал. 1978. №6, 1204-1206
 - 3.20 Стишков Ю.К., Рычков Ю.М. Стационарная электризация неподвижного слабопроводящего бинарного электролита // Электронная обработка материалов. 1981. №6.

- 3.21 Стишков Ю.К. Ионизационно-рекомбинационный механизм зарядообразования // Докл. АН СССР. 1986. Т.288. №4. С. 861
- 3.22 Стишков Ю.К., Барановский Л.Л. Капельный метод исследования объемного заряда в слабо проводящих жидкостях // Магнитная гидродинамика. 1983. №2.
- 3.23 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л. Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 174 с.
- 3.24 Грошев А.К., Михайлов С.А., Стишков Ю.К. Влияние свойств границы электрод-жидкость на высоковольтную проводимость жидких диэлектриков // Тезисы докладов III Межреспубликанского семинара, Гродно, 1992.
- 3.25 Стишков Ю.К., Шапошников А.М. Электрофизические процессы в жидкостях и газах. Том 2 Механизмы электропроводности и зарядообразования в жидких диэлектриках. Учебно-методическое пособие; Санкт-Петербургский гос. ун-т, Физический фак., Науч.-образовательный центр "Электрофизика", Санкт-Петербург, 2009, 144с.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ (ЭГД) ТЕЧЕНИЙ

При экспериментальном изучении ЭГД-течений исследователи, прежде всего, сталкиваются с проблемой их визуализации, поскольку сами струйки ЭГД-течения невидны невооружённым глазом. Существует несколько методов визуализации ЭГД-течений. Один из наиболее часто используемых – это метод визуализирующих включений, который широко используется в гидродинамике. Суть метода визуализирующих включений заключается в том, что в жидкость вводятся специальные видимые «метки», например, твердые визуализирующие частицы или пузырьки воздуха. Однако выбор визуализирующих частиц является весьма сложной задачей, поскольку всевозможные примеси, которые могли бы использоваться для визуализации, могут существенно повлиять на сам изучаемый эффект [4.1-4.9]. В основе метода визуализирующих частиц лежит предположение, что «метки» двигаются вместе с жидкостью, и по их движению можно судить о характере течения, его скорости и распределении движущих сил в области локализации течения. Этот метод сталкивается с рядом трудностей. ЭГД-течения существуют в условиях сильных электрических полей с напряженностью порядка десяти киловольт на сантиметр, и электрические характеристики материала, из которого изготовлены частицы, могут существенно повлиять на исходные электрофизические свойства исследуемой жидкости и поэтому имеют большое значение [4.4,4.5]. Если электрическая проводимость метки выше проводимости исследуемой жидкости, то под действием электрического поля метка приобретет электрический заряд, отличный от заряда окружающей жидкости, и её скорость будет отличаться от скорости течения жидкости. Различие диэлектрических характеристик взвешенных частиц и окружающей жидкости приводит к тому, что в сильно неоднородном поле частицы также будут двигаться относительно жидкости [4.5,4.9]. На движение взвешенных частиц могут оказывать влияние и другие эффекты и явления, связанные с различными диэлектрическими свойствами частиц и окружающей их жидкости. Все это существенно затрудняет наблюдение ЭГД-течений. Один из способов устранения побочных эффектов состоит в рациональном выборе диэлектрических свойств жидкости и взвешенных частиц как можно более близкими друг к другу. Однако это неизбежно приведет к снижению их отражающей способности, которая, в свою очередь, пропорциональна относительному показателю преломления. Если частицы обладают одинаковыми с жидкостью диэлектрическими свойствами, то они будут оптически неотличимы от жидкости.

Таким образом, для визуализации ЭГД-течений в слабопроводящей жидкости могут быть использованы метки, отличающиеся по своим оптическим свойствам от свойств среды и, по возможности, пассивно движущиеся с жидкостью. Введение меток не должно существенно изменять электрофизических свойств среды. Их размеры должны быть достаточно малыми, чтобы, с одной стороны, по возможности, не исказить кинематику ис-

следуемого потока и не проскальзывать относительно жидкости под действием электрических и гравитационных сил, а с другой стороны, чтобы оставлять достаточно контрастный след на видеозаписи. Дополнительно к этому, плотность метки должна мало отличаться от плотности жидкости, и границы метки не должны изменяться под влиянием электрического и гравитационного полей. Эти требования существенно сужают круг веществ, которые могут быть использованы в качестве меток. Автором разработан метод визуализации ЭГД-течений при помощи мелких (микронных) газовых пузырьков [4.4,4.5]. Пузырьки, не имеют большинства упомянутых недостатков. Они вводятся в исследуемую область при помощи специального капилляра, изготовленного из полиэтиленовой трубочки. Исследование поведения газовых пузырьков показало, что относительная погрешность в измерении скорости ЭГД-течения, обусловленная индивидуальным движением пузырьков, в области интереса, как правило, не превышает 1–5 %. Пузырьки не заряжаются от электродов даже в сильно неоднородных электрических полях, например, образованных в системе электродов игла-плоскость, и, следовательно, не испытывают действия кулоновской силы. Теоретическое рассмотрение влияния диэлектрических сил на движение пузырей и соответствующие экспериментальные исследования представлены, например, в [4.5, 4.6]. Действие диэлектрофоретической силы проявляется лишь в сильно неоднородных электрических полях и в реальных условиях ощущается весьма слабо. Основной причиной движения пузырьков является ЭГД-течение, что позволяет их использовать для точного измерения скорости жидкости. Преимуществом пузырьков является то, что они не загрязняют жидкость, и после проведения эксперимента жидкость не требует фильтрации. Кроме того, если газовые пузырьки вводить в жидкость при помощи специальных капилляров из изолирующего материала (например, полиэтилена), то можно:

- калибровать метки по размерам;
- реализовать необходимую дозировку меток;
- вносить минимум загрязнений в жидкость;
- облегчать ввод и вывод меток из области наблюдения;
- использовать различные газы для производства пузырей.

Таким образом, пузырьки воздуха являются наиболее подходящим для визуализации ЭГД-течений инструментом. Их траектории значительно контрастнее траекторий твердых включений, и при использовании импульсной подсветки их поле скоростей можно восстановить при помощи метода траекторий [4.14]. Таким образом, для визуализации ЭГД-течений в слабопроводящей жидкости могут быть использованы метки, отличающиеся по своим оптическим свойствам от свойств среды и, по возможности, пассивно движущиеся с жидкостью. Введение меток не должно существенно изменять электрофизических свойств среды. Их размеры должны быть достаточно малыми, чтобы, с одной стороны, по возможности, не исказить кинематику исследуемого потока и не проскальзывать относительно жидкости под действием электрических и гравитационных сил, а с другой стороны, чтобы оставлять достаточно контрастный след на видеозаписи. Дополнительно к этому, плотность метки должна мало отличаться от плотности жидкости, и границы метки не должны изменяться под влиянием электрического и гравитационного полей. Эти требования существенно сужают круг веществ, которые могут быть использованы в качестве меток.

Одним из вариантов визуализирующих частиц является оксид кремния SiO_2 . Он представляет собой твердые бесцветные кристаллы, размер которых может быть умень-

шен до долей микрометра. Они не растворяются в типовых диэлектрических жидкостях и благодаря своим малым размерам практически не изменяют свойства рабочей жидкости и долго не оседают на дно кюветы. Тем не менее, введение таких частиц в жидкость приводит к изменению проводимости последней, благодаря появлению дисперсионного механизма проводимости, что было исследовано в [4.11]. Там же показано, что влияние кристаллов SiO_2 на высоковольтный участок ВАХ в несимметричных электрических полях зависит от выбранной полярности. Поэтому допустимо лишь весьма ограниченное введение такой примеси, и рекомендуемое значение, составляет 0.05 г/л. Ещё одним недостатком такой визуализации является необходимость использования кристаллов слишком малых размеров, что приводит к их плохой отражающей способности.

Другим примером визуализирующих частиц, лишённым большинства упомянутых недостатков, являются мелкие газовые пузырьки [4.4 -4.9]. Исследование поведения газовых пузырьков показало, что относительная погрешность в измерении скорости ЭГД-течения, обусловленная индивидуальным движением пузырьков, как правило, не превышает 5-10 %. Пузырьки не заряжаются от электродов даже в сильно неоднородных электрических полях, например, образованных в системе электродов игла-плоскость, и, следовательно, не испытывают действия кулоновской силы. Теоретическое рассмотрение влияния диэлектрических сил на движение пузырей и соответствующие экспериментальные исследования представлены, например, в [4.5,4.6]. Действие диэлектрофоретической силы проявляется лишь в сильно неоднородных электрических полях и в реальных условиях ощущается весьма слабо. Основной причиной движения пузырьков является ЭГД-течение, что позволяет их использовать для точного измерения скорости жидкости.

Преимуществом пузырьков является то, что они не загрязняют жидкость, и после проведения эксперимента жидкость не требует фильтрации. Кроме того, если газовые пузырьки вводить в жидкость при помощи специальных капилляров из изолирующего материала (например, полиэтилена), то можно:

- калибровать метки по размерам;
- реализовать необходимую дозировку меток;
- вносить минимум загрязнений в жидкость;
- облегчать ввод и вывод меток из области наблюдения
- использовать различные газы для производства пузырей.

Равномерное заполнение исследуемой области течения можно осуществить путем перемещения капилляра поперек потока исследуемой жидкости. Таким образом, пузырьки воздуха являются наиболее подходящим для визуализации ЭГД-течений инструментом.

Исследование ЭГД-течений при помощи нелинейного оптического эффекта.

Еще один метод, не имеющий указанных недостатков, предложен автором в работах [4.12,4.13]. Этот метод не использует визуализирующие включения, а основан на т.н. нелинейном оптическом эффекте. Нелинейные оптические эффекты обычно возникают при распространении мощного светового луча в среде и связаны с изменением её оптических свойств под действием световой волны. Нелинейные эффекты появляются при мощности светового луча выше некоторой критической. К таким оптическим эффектам относят: самофокусировку (дефокусировку) лазерного луча. Лазерный луч, проходя через среду,

нагревает её, что приводит к изменению оптических свойств среды: она становится подобна тепловой отрицательной (рассеивающей, т.к. коэффициент преломления пропорционален тепловому изменению плотности, которая при нагреве уменьшается) линзе, в результате чего луч лазера расфокусируется.

В неполярных жидких диэлектриках связь коэффициента преломления с температурой определяется формулой Лорентц – Лорентца и пропорциональна температурному изменению плотности:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = A\rho_0(1 + \alpha T) \quad (4.1)$$

(α – коэффициент объёмного расширения жидкости, ρ_0 – плотность при комнатной температуре).

В реальных лазерах чаще всего имеет место гауссово распределение амплитуды по координате. При этом среда с показателем преломления, заданным выражением (1), становится оптически неоднородной. В такой среде лучи испытывают нелинейную рефракцию, отклоняясь в область больших значений показателя преломления, а именно от оси пучка к периферии. Это приводит к самодефокусировке света, а слой нелинейной среды играет роль отрицательной (рассеивающей) линзы с фокусным расстоянием, зависящим от интенсивности пучка. Наибольшее отклонение испытывают лучи, выходящие из области максимального градиента наведенной поперечной неоднородности показателя преломления. Лучи, выходящие под разными углами, интерферируют между собой. При изначально гауссовом распределении интенсивности в сечении луча на выходе наблюдается система интерференционных колец.

Экспериментальное исследование НОЭГД эффекта.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.4.1

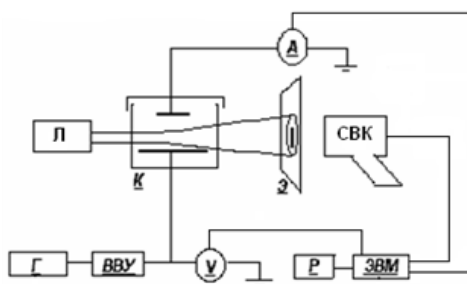


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки

На рис. 4.1: Л – лазер; К – кювета с электродами и исследуемой жидкостью; Г – генератор сигналов специальной формы; ВВУ – высоковольтная установка; СВК – скоростная видеокамера; Э – матовый экран; V – вольтметр; А – амперметр.

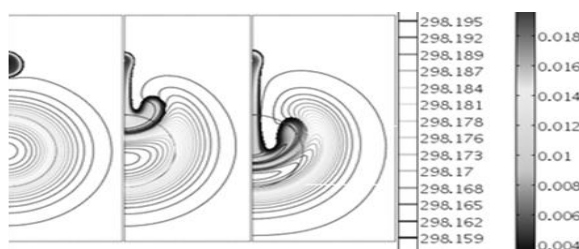


Рис. 4.2. Распространение центральной струи ЭГД-течения через луч лазера.

Кювета с жидкостью представляет собой сосуд из органического стекла размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$ с торцевыми стенками из оптического стекла. Электрическое поле создаётся электродами – проводом над плоской пластиной, размещёнными в кювете. Луч лазера (мощностью 10 мВт) пропускается через кювету параллельно цилиндрическому электроду и падает на матовый экран Э, установленный на базовом расстоянии l_1 от кюветы. Получаемое на экране изображение фиксируется при помощи скоростной видеокамеры (2000 кадров/сек.).

На рис. 4.3 в порядке слева направо приведены последовательные во времени стадии изменения геометрических и яркостных характеристик луча при включении электрического напряжения 10 кВ. Длительность кадра составляет 500 мкс. На представленных кадрах хорошо видны различные стадии эволюции яркостного пятна. На первом этапе происходит деформация интерференционных колец, появляется вытянутая область, направленная противоположно течению (течение здесь слева направо). Далее вытянутая область начинает заостряться и одновременно с этим увеличивается её яркость. При этом данный процесс происходит во всех интерференционных кольцах (кадр 3). В дальнейшем яркость этой точки продолжает увеличиваться, одновременно с этим падает яркость интерференционных колец (кадры 4-5).

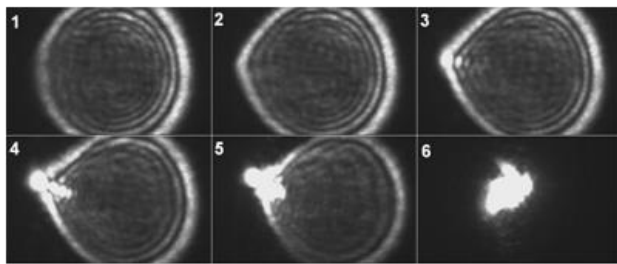


Рис.4.3. Видеокадры нелинейного ОЭГД эффекта.

В заключительной стадии яркая точка перемещается в центр картины, т.е. эффект дефокусировки полностью пропадает.

Для описания НОЭГД к системе решаемых уравнений ЭГД добавляется уравнение теплопроводности. Система электродов нить – плоскость, между которыми находится нагреваемая цилиндрическая

область диаметром 4мм – лазерный луч (рис. 4.4). Плоскость заземлена, на нить подаётся напряжение 5кВ.

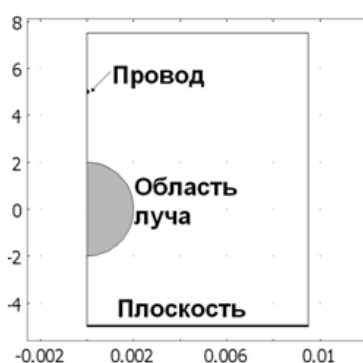


Рис. 4.4. Геометрия модели.

Задача решается нестационарная. В течении первых 10 секунд жидкость нагревается, затем включается течение. На рис. 4.3 приведены последовательные стадии развития ЭГД течения в кювете и деформации поля температур. До того момента, когда фронт распространения объёмного заряда не достигнет области нагретой жидкости поле температур не испытывает сколь либо заметных возмущений. При достижении фронтом края нагретой области холодная жидкость начинает вытеснять более горячую, деформируя поле температур. Для того чтобы понять, как будет выглядеть при этом процессе

яркостная картина на экране, был реализован следующий алгоритм. На рис. 4.5 приведено качественное сравнение характерных стадий эволюции яркостной картины, полученной при моделировании с данными эксперимента. Лазерный луч слабо отклоняется при прохождении десятисантиметровой кюветы, поэтому можно считать, что его преломление происходит не внутри, а на границе после прохождения кюве-

ты. Тогда для расчета отклонения луча можно использовать распределение температур из проведенного ранее моделирования.

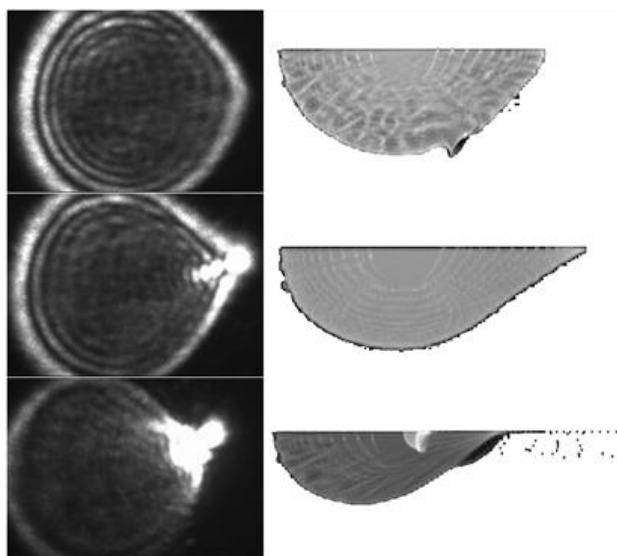


Рис. 4.5. Качественное сравнение экспериментальных данных (слева) и результатов моделирования (справа).

В качестве исходных данных используется распределение температур из области свечения лазера (см. рис. 4.4). Затем разбиваем лазерный луч на набор маленьких рядом находящихся лучей. Поскольку отклонение каждого такого луча прямо пропорционально градиенту температуры (с противоположным знаком) в точке его прохождения, то выполняя умножение его на коэффициент и учитывая его первоначальное положение, получаем координату попадания луча на экран. Экран в программе представляет собой матрицу яркостей, на которой суммируются все лучи (на рис снизу в цветовой шкале «радуга»). Таким образом, выполняя эту процедуру для всех лучей на которые разбит исходный,

получаем результирующую интерференционную картину. Обработывая таким образом каждый последовательный шаг по времени можно проследить как будет меняться яркостная картина, получаемой на экране.

Видно достаточно хорошее соответствие, что позволяет сделать вывод о возможности применения НОЭГД эффекта для исследования качественных характеристик течений [4.13].

Экспериментальная установка для исследования ЭГД-течений методом визуализирующих включений.

Блок-схема экспериментального стенда для исследования ЭГД-течений, разработанная автором [4.9] представлена на рис. 4.6. Она состоит из следующих блоков.

- Экспериментальная кювета, представляющая собой прозрачный прямоугольный или цилиндрический сосуд, который заполнен исследуемой жидкостью. В кювете размещена исследуемая система электродов.
- Высоковольтный источник питания (ВВ-источник), создающий необходимую разность потенциалов между электродами. Типовой диапазон применяемого напряжения – от 0 до 50 кВ. Для измерения напряжения к высоковольтному источнику подключается резистивный делитель.
- Блок подсветки, служащий для импульсной подсветки межэлектродного промежутка узким пучком света. Для подсветки обычно используется светодиод или лазер, свет от которых цилиндрической линзой преобразуется в полосу света. Для того чтобы след от визуализирующих частиц получался не размазанным, питание лазера (диода) осуществляется от генератора сигналов, который позволяет формировать импульсы напряжения с малой длительностью.
- Пневматический канал, предназначенный для введения в жидкость пузырьков воздуха малого диаметра с помощью компрессора через специальный капилляр. Дав-

ление воздуха в капилляре измеряется манометром и регулируется впускным краном. Получаемые пузырьки служат для визуализации ЭГД-течений.

- Блок видеоканала, предназначенный для наблюдения на экране монитора и записи в компьютер ЭГД-течений и состоящий из высокочувствительной видеокамеры с блоком питания, монитора и платы видео захвата.
- Блок регистрации электрических параметров, состоящий из измерителя малых токов, делителя напряжения и устройства АЦП (например, L-Card). Он используется для измерения напряжения и силы электрического тока, протекающего через кювету.
- Компьютер со встроенной платой АЦП, использующийся для регистрации экспериментальных данных и их дальнейшей обработки.

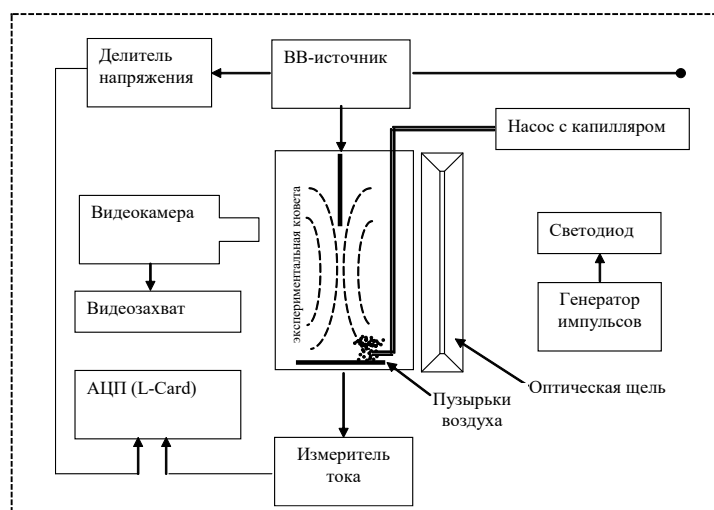


Рис.4.6. Блок-схема экспериментальной установки.

Методы восстановления поля скоростей ЭГД-течений.

На сегодняшний день значительный прогресс в области вычислительной техники позволяет получить существенно больше информации о кинематической структуре ЭГД-течений, чем это было возможно ранее. Применение компьютеров повышенной производительности уменьшает время, затрачиваемое на обработку результатов, а также позволяет внедрять новые методы восстановления поля скоростей гидродинамических течений. В настоящее время есть несколько основных методов восстановления поля скоростей гидродинамических течений по движению визуализирующих включений, из которых наиболее распространены два: анемометрия по изображениям частиц (англ. Particle Image Velocimetry (PIV) [4.14] и метод трассировки частиц (англ. Particle Tracking Velocimetry (PTV)). Далее будем называть их PIV-метод и PTV-метод.

В основе обоих методов заложена визуализация гидродинамического потока при помощи специальных меток с последующей съёмкой их движения на видеокамеру. Однако между этими двумя подходами есть разница (см. рис.4.7). Так, в PTV-методе необходимая для исследования плотность визуализирующих включений мала, и при переходе от кадра к кадру можно проследить траектории движения отдельных частиц (поэтому в английском названии метода есть слово “tracking” – отслеживание). А в PIV-методе [11] необходимая плотность визуализирующих частиц значительно больше, и отследить траекторию движения одиночных частиц при переходе от кадра к кадру очень сложно. Зато для

восстановления поля скоростей можно применять стандартный статистический анализ, о котором будет рассказано ниже.

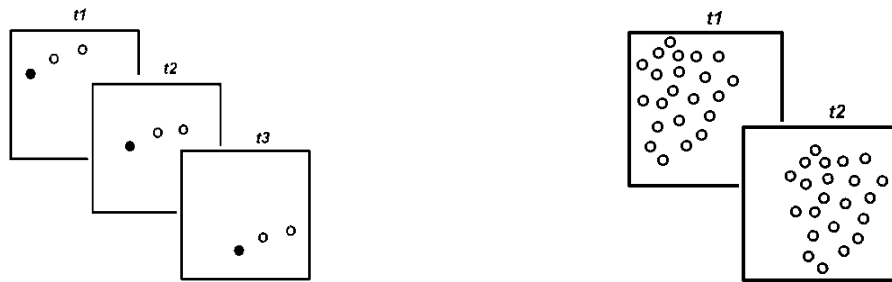


Рис. 4.7. Схематичное изображение видеок кадров с различной плотностью визуализирующих частиц: слева – для PTV-метода, справа – для PIV-метода.

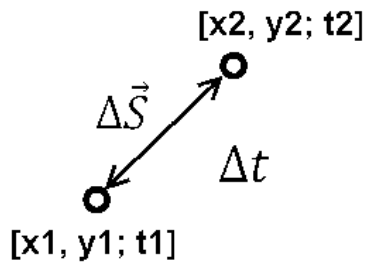


Рис.4.8 Смещение трассера между двумя последовательными кадрами.

Рассмотрим принципы определения скорости гидродинамического потока по фотографиям движения визуализирующих частиц (трассеров). В основе обоих методов лежит вычисление средней скорости, которая равняется отношению смещения меток между двумя последовательными кадрами ко времени, за которое это смещение произошло (т.е. ко времени между этими кадрами). Так, если в момент времени t_1 частичка (трассер) находился в точке с координатами $\{x_1, y_1\}$, а в момент t_2 – $\{x_2, y_2\}$ (рис.4.8), то

средняя скорость движения на данном отрезке будет равняться:

$$\langle v \rangle = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

PTV-метод.

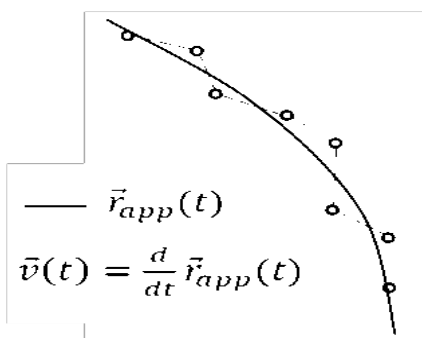


Рис.4.9. Применение аппроксимации (красная линия) для повышения точности восстановления траектории частицы по дискретным точкам (жёлтые круги).

В случае PTV-метода прослеживается траектория движения каждой визуализирующей частицы. Для этого на каждом кадре производится выбор следа от одного и того же трассера. Далее, соответствующие координаты записываются в матрицу и дополняются значениями времени, которые соответствуют временному интервалу между кадрами. В результате, получается набор данных $\vec{r}(t)$, т.е. траектория визуализирующей частицы, вдоль которой имеются точки, в которых возможен расчет скорости. По этим данным уже можно рассчитать локальную скорость частицы на каждом интервале пройденного пути, как отношение смещения ко времени. Кроме того, скорость можно рассчитать в каждой точке, как производную от вектора траектории. Но, во-первых, данные определенные первым методом будут дискретными (по пространству), а, во-вторых,

полученные значения скорости, в общем случае, будут иметь большую погрешность, связанную с неточностью определения координат трассеров, которая, в свою очередь, зависит от разрешения матрицы видеокамеры и прочих условий. Однако, благодаря тому, что в PTV-методе восстанавливается как траектория, так и отдельные отрезки, то можно про-

вести аппроксимацию скорости вдоль траектории. В результате траектория будет описываться гладкой аналитической функцией, от которой можно вычислить производную. Это снижает погрешность результатов и, более того, позволит получить информацию о скорости вдоль всей траектории, а не только в дискретном наборе точек.

Программа EHD reader [4.13].

Программа *EHD reader* основана на PTV-методе, разработана сотрудниками и студентами НОЦ «Электрофизика» и позволяет частично автоматизировать процесс обработки последовательной серии видеок кадров либо фотографий движущихся объектов и тем самым уменьшить затрачиваемое на получение результатов время. Данная программа полностью реализована в среде MATLAB и снабжена удобным графическим интерфейсом. Она состоит из двух основных модулей, один из которых обеспечивает загрузку графических файлов и позволяет выделять на них движущиеся объекты, а второй осуществляет восстановление траекторий, рассчитывает поле скоростей и графически представляет полученные результаты. Используются средства стандартных библиотек системы MATLAB: Image Processing Toolbox и Spline Toolbox. От пользователя не требуется ни знания методов компьютерной обработки изображения, ни численных методов, а также навыков программирования в среде MATLAB. Для работы данной программы нет необходимости в предварительной подготовке используемых изображений.

Электрогидродинамические течения – это самопроизвольное движение жидкости под воздействием сильного электрического поля. Необходимыми условиями для возникновения ЭГД-течений является: существование в жидкости объемного электрического заряда и наличие в жидкости электрического поля. Этим условиям удовлетворяют далеко не все жидкости. Как показано в предыдущей главе в проводящие жидкости инжектированный заряд не проникает, а гибнет в пределах рекомбинационных слоев, а, следовательно, в них нет условий для возникновения ЭГД-течений. Электрогидродинамические течения обычно наблюдаются в технических жидких диэлектриках с некоторым уровнем начальной проводимости, начиная с некоторого порогового напряжения. Обычно пороговое напряжение примерно равно напряжению перехода к нелинейному участку вольтамперной характеристики, поэтому в ряде работ [4.9] было высказано предположение о конвективном характере высоковольтной проводимости диэлектрических жидкостей. Это предположение действительно соответствует действительности, что будет показано далее. В отличие от газов, где электрический ветер возникает только в сильно неоднородных электрических полях, ЭГД-течения в жидкости реализуются даже в системе электродов типа двух параллельных плоскостей.

Систематические исследования структуры ЭГД-течений в различных жидкостях показали, что в хорошо очищенных жидкостях, с уровнем низковольтной проводимости менее чем 10^{-13} сим/м, как правило возникают крайне нестабильные ЭГД-течения, а порог их возникновения повышается. Эти течения характеризуются постоянной сменой интенсивности и направления течения. Особенно остро эти флуктуации проявляются, когда подводимый высоковольтный провод покрыт изолирующей трубкой. Поэтому получить фотографию стационарных линий тока подобного течения практически невозможно. Подобные

флуктуации не являются следствием турбулизации течения. Они связаны с флуктуациями процесса образования ионов на поверхности электродов, а, следовательно, флуктуациями действующих объемных сил. Как показали исследования ВАХ очищенных жидкостей, на них также регистрируются постоянные флуктуации тока через жидкость. Как уже отмечалось ранее ток через жидкость обычно стабилизируется, если в жидкость ввести примеси, обладающие электронно-акцепторными, или электронно-донорными свойствами. Это стабилизирует как ток, так и структуру ЭГД-течений. При этом стационарные линии тока подобных ЭГД-течений обычно параллельноструйные, без признаков турбулизации.

Анализ структуры ЭГД-течений в ограниченном объеме в несимметричной системе электродов типа провод над плоскостью.

Этот раздел посвящен анализу результатов систематического экспериментального исследования ЭГД-течений в системе электродов провод–плоскость, размещенном в кювете небольших размеров. В этом случае один из электродов по геометрическим причинам имеет в своей окрестности повышенную напряженность электрического поля, а значит и облегченные условия поверхностного зарядообразования, второй – плоский непроницаем для жидкости. Поэтому можно считать, что процесс инжекции реализуется преимущественно у проволочного электрода, что и определяет направление течения: от провода к плоскости.

В системе электродов провод над плоскостью при достаточной длине проволочного электрода реализуется режим двумерного течения, что существенно облегчает анализ структуры течения. Анализируемые ЭГД-течения зависят всего от нескольких параметров: диаметра электродов, величины прикладываемого напряжения, длины межэлектродного промежутка, низковольтной проводимости жидкости, а также материала электродов, концентрации и состава примесей. В экспериментах последовательно изменялись все перечисленные параметры. Большинство экспериментов проводилось в трансформаторном масле с примесью йода или бутанола – примеси с повышенными электронно-акцепторными свойствами. В качестве электродов использована система «провод (лезвие) – плоскость». На линейных графиках в данной главе: провод расположен слева, плоскость – справа. ЭГД-течение в подобной системе направлено от проволочного электрода к плоскости и носит двумерный “плоский” характер. Обработка траекторий пузырьков проводилась РТВ методом, т.е. путем выделения отдельных линий тока течения с последующим восстановлением компонент векторов скорости и ускорения. В настоящее время накоплен большой банк данных, содержащий фотографии ЭГД-течений, видеофильмы ЭГД-течений, общим объемом более 10000 кадров, снятых в различных условиях. Как уже отмечалось ранее кинематика и динамика ЭГД-течений в большом классе слабо проводящих жидкостей определяется типом реакций ионообразования (инжекции) на поверхности электродов, конфигурацией внешнего электрического поля, создаваемого электродами, а в некоторых случаях также и конфигурацией внутреннего электрического поля, наведенного объемным зарядом. В жидкостях повышенной проводимости реализуются ЭГД-течения, обусловленные эффектом Вина. Таким образом, внимательно исследуя кинематическую и динамическую структуры ЭГД-течений можно сделать существенные выводы о процессах, происходящих в жидкости: структуре объемного заряда и распределении электрического поля. Наиболее полные и целенаправленные исследования кинематиче-

ской и динамической структур ЭГД-течений были представлены в монографии [4.9]. В этой работе были впервые описаны основные свойства ЭГД-течений.

Основные свойства ЭГД-течений инжекционного типа [4.15 – 4.21].

Диапазон существования ЭГД-течений [4.15-4.16]. Долгое время проблематичным остается вопрос о существовании порога ЭГД-течений. Это связано с тем, что при исследованиях методом визуализирующих включений невозможно совершенно избавиться от их самодвижения в гравитационном поле. Когда речь идет об изучении очень малых скоростей, ЭГД-эффекты становятся неразличимы на фоне термогравитационных. Тем более нарушение гидростатического равновесия обнаруживается лишь в пределах приэлектродных зон. Поэтому некоторые авторы говорят лишь о заметных ЭГД-течениях. Но проблема существования порога ЭГД-течений принципиальна. В предыдущей главе показано, что причины появления объемного заряда в слабых электролитах, к которым относятся жидкие диэлектрики, связаны с неравновесными диссоационно-рекомбинационными процессами в приэлектродных областях. Показано, что в до пороговой области напряжений в приэлектродных областях возникают диссоационно-рекомбинационные слои гетерозаряда, а в после пороговой области ионизационно-рекомбинационные слои гомозаряда. Поэтому в до пороговой области следует ожидать появления аномальных течений, направленных на электрод с малым радиусом кривизны, а в после пороговой области напряжений ЭГД-течения должны быть направлены из области сильно неоднородного поля: т.е. от игольчатого(проволочного) электрода к плоскому.

В наших опытах для исследования около пороговых течений были использованы одновременно несколько различных методов. Впервые существование порога было замечено при изучении интенсификации теплообмена в электрическом поле. Эффект обнаруживается следующим образом, если в качестве одного из электродов выбрать провод, слабо нагреваемый протекающим через него током, а в качестве второго – плоскую пластину и подавать на электроды напряжение, то при повышении напряжения в диапазоне до нескольких сотен вольт коэффициент теплоотдачи сначала уменьшается, а затем, с некоторого порогового значения, начинает возрастать. До пороговый участок связан с наличием в жидкости слабых т.н. ЭГД-течений проводимости, обусловленных гетеро заряженными неравновесными слоями, а после пороговый участок увеличения теплоотвода связан с ростом коэффициента теплоотдачи и обусловлен возникновением в жидкости ЭГД-течений инжекционного типа. Существование докритического участка уменьшения коэффициента теплообмена позволяет уверенно фиксировать порог возникновения течений. Что касается наблюдений кинематики течений методом визуализирующих пузырьков, то на существование порога указывает очень быстрый рост скорости течений в после пороговой области напряжений. При наблюдениях замечен следующий результат: при подаче на электроды напряжения ниже некоторой критической величины, в жидкости иногда удается зарегистрировать слабые ЭГД-течения, направленные на игольчатый(проволочный) электрод. С повышением напряжения их интенсивность у электродов вначале падает, жидкость как бы «замораживается», а при подаче напряжения выше критического значения возникают нормальные ЭГД-течения от электрода. Эффект «замораживания» по-видимому связан с переходом из режима проводимости в режим инжекции и облегчает обнаружение порога возникновения течений инжекционного типа. В следующей главе при помощи компью-

терного моделирования будет дано количественное объяснение порогового напряжения. Наиболее убедительные результаты, свидетельствующие о наличии порогового напряжения, были получены при исследовании объемного заряда капельным методом. При напряжениях ниже некоторого критического значения в жидкости в приэлектродных областях уверенно регистрируется гетерозаряд, сначала возрастающий, а затем, с ростом напряжения, уменьшающийся до нуля. Как известно, наличие гетерозаряда в приэлектродной области может привести к появлению аномальных ЭГД-течений на проволочном электроде. С появлением инъекции гетерозарядные слои вырождаются и трансформируются в гомозарядные. При этом интенсивность аномальных ЭГД-течений спадает. Коэффициент теплоотдачи при этом падает вследствие уменьшения скорости аномальных ЭГД-течений. При пороговом напряжении объемный заряд в жидкости вырождается и течения останавливаются. Гомозаряд, возникающий при после порогового напряжения, приводит к возникновению ЭГД-течений инъекционного типа, направленных от проволочного электрода. Следствием этого является быстрое увеличение коэффициента теплоотдачи. Поскольку аномальные течения слабы, то зарегистрировать их удается не всегда.

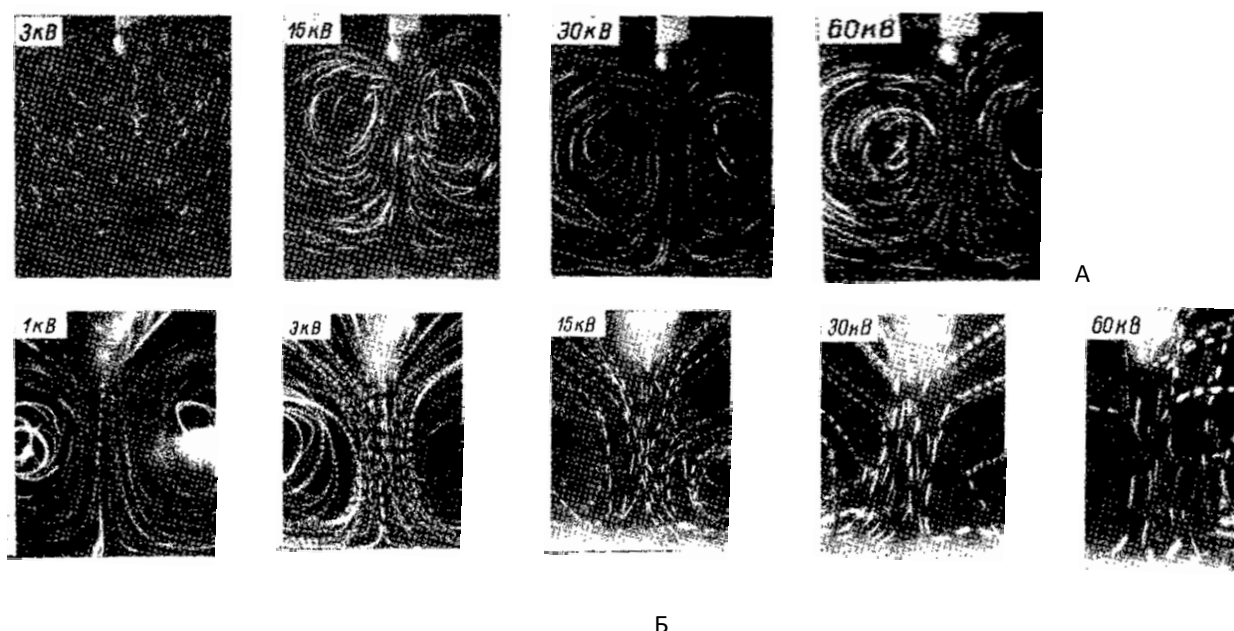


Рис. 4.10. Центральные струи ЭГД-течений при разных напряжениях на электродах, электроды шар-плоскость, А – касторовое масло, Б – 10 %-ый раствор бутанола в трансформаторном масле.

Далее представлены результаты компьютерного анализа имеющихся в базе данных фотографий и видеозаписей ЭГД-течений. Материалы прошли компьютерную обработку и представлены в виде векторных полей скоростей и ускорений, карт линий уровня или поверхностных графиков скоростей и ускорений, а также в некоторых случаях восстановлены линии тока стационарного ЭГД-течения. Кроме этого иногда восстановлены распределения ускорений вдоль любой выбранной линии тока и вычислены некоторые интегральные характеристики, например, расход жидкости между любых двух произвольно выбранных линий тока жидкости. За единицу длины в безразмерном представлении обычно выбрано межэлектродное расстояние. Начало координат обычно соответствует поверхности проволочного электрода, плоский электрод находится на уровне $x = 1$. Диапазон существования ЭГД-течений ограничен сверху напряжением, приводящим к пробоем жид-

кости. Для исследований ЭГД-течений в области пред пробойных напряжений в схему питания обычно вводится защитное сопротивление $R = 300 \text{ МОм}$, которое для предотвращения выхода из строя измерительной аппаратуры ограничивает величину разрядного тока и энергию разряда. Ток разряда при введении такого сопротивления обычно не превышает 10^{-4} А , а энергия разряда не превышает 10^{-5} Вт/с . Столь маломощный разряд, не вызывает существенных изменений химического состава исследуемой жидкости, и поэтому после разряда можно вновь исследовать ЭГД-течение не заменяя исследуемую жидкость, а в некоторых экспериментах производить исследование ЭГД-течения в одной и той же порции жидкости на фоне многократных слаботочных разрядов.

На рис.4.10 представлены фотографии ЭГД-течений в закрытой кювете при разных напряжениях на электродах. Фотографии серии (А) были получены для системы электродов шар-плоская пластина (диаметр шара 3,0 мм) в касторовом масле в диапазоне напряжений 2÷25 кВ. Порог возникновения течений в этой жидкости составляет 1 кВ. Видно, что при сравнительно низких напряжениях течение реализуется в виде двух замкнутых ячеек, локализованных у поверхности шарового электрода, и не охватывает периферийных слоев жидкости. С ростом напряжения область локализации приэлектродных вихрей расширяется в глубину межэлектродного промежутка к плоскому противозлектроду до тех пор, пока течение не охватит всего межэлектродного промежутка. По фотографиям ЭГД-течений в касторовом масле можно видеть, что во всем исследованном диапазоне развитое течение носит параллельно-струйный ламинарный характер. Линии тока жидкости взаимно параллельны и не имеют мелкомасштабных завихрений. Вид ЭГД-ячеек и их характерные размеры сравнительно мало изменяются во всем исследованном диапазоне напряжений.

Серия фотографий (Б) (рис.4.10) была получена в 10 %-ном растворе бутилового спирта в трансформаторном масле для расширенного диапазона напряжений 1÷60 кВ при межэлектродном расстоянии 1 см.

Пробивной участок в этой жидкости лежит в диапазоне 60÷65 кВ, а пороговое напряжение равно 300 В. Течение также в целом, сохраняет параллельно-струйный характер, хотя на общем упорядоченном фоне имеют место отдельные нарушения, увеличивающиеся с ростом напряжения на электродах. Это, например, флуктуации направления центральной струи, приводящие к появлению пересекающихся траекторий визуализирующих частиц. Эти отклонения, по-видимому, следует связать с временной нестабильностью генерации заряда в среде и, следовательно, с нестабильностью действующих кулоновских сил, а не с турбулизацией самого течения в классическом понимании.

Анализ фотографий рис.4.10 и линий тока ЭГД-течения в различных условиях показывает, что основную часть течения составляет центральная струя, распространяющаяся от лезвиеобразного электрода к плоскому. Именно эта часть течения заряжена и носит силовой характер, т.к. она переносит инжектированный заряд от проволочного электрода к плоскому. Инжектированные ионы, получившие электрический заряд на поверхности лезвиеобразного электрода, в пределах неподвижного приэлектродного слоя движется относительно жидкости со скоростью, определяемой низковольтной подвижностью иона, формируя вокруг себя некую надмолекулярную структуру, обеспечивающую в дальнейшем повышенную степень взаимодействия с молекулярным окружением. Далее ионы разгоняет окружающую нейтральную жидкость в пределах зоны ускорения. Величина сред-

ней электрогидродинамической подвижности $Re_{эл}$, определяемая как отношение средней скорости жидкости v к средней скорости движения ионов относительно жидкости $b \cdot E$, в центральной струе ЭГД-течения составляет 10-20, т.е. вне зоны ускорения ионы практически «вморожены» в жидкость. Причины вмороженности ионов в окружающую жидкость обсуждались в главе 3.

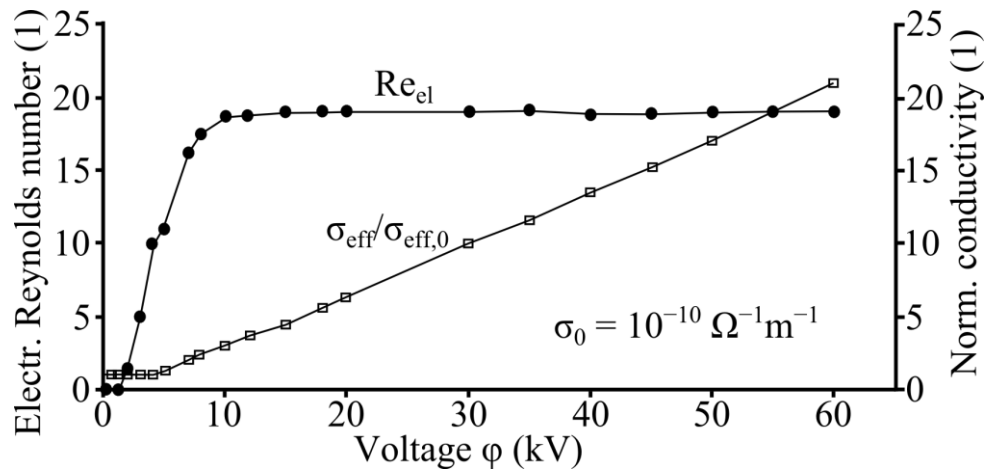


Рис.4.11. Зависимость электрического числа Рейнольдса (Re_{el}) и приведенной проводимости ячейки от напряжения на электродах.

В некотором диапазоне напряжений, лежащем непосредственно за порогом возникновения, центральная струя не достигает противоиэлектрода и течения носят неразвитый характер, далее следует режим развитого ЭГД-течения. Течения, возникающие непосредственно после порога, обычно локализованы в окрестности активного электрода, такие течения названы неразвитыми, а течения, занимающие весь межэлектродный промежуток – названы развитыми. В следующей главе при анализе результатов компьютерного моделирования ЭГД-течений, будет дан детальный анализ причин появления неразвитого течения и анализа его перехода в развитое течение. Как видно из рис. 4.10 и 4.11 в режиме неразвитого ЭГД-течения электрическое число Рейнольдса возрастает, а в режиме развитого течения оно практически постоянно. Дальнейший анализ касается в основном структуры развитых ЭГД-течений. Сравнительный анализ кинематики развитых ЭГД-течений при различных напряжениях, не выявил существенных структурных различий. Описанная зонная структура сохраняется. Зависимости (расхода) средней скорости в центральной струе от напряжения на электродах в режиме неразвитого течения носят степенной характер $V \sim U^k$ ($k > 2$), в режиме развитого течения обычно зависимость средней скорости от напряжения - линейна ($k = 1$), что соответствует постоянному значению Re_{el} . На рис.4.11 зависимость $Re_{el} = f(U)$ представлена для течения в системе лезвие-плоскость, там же в безразмерной форме представлены соответствующая вольтамперная характеристика. Видно, что зависимость $Re_{el} = f(U)$ имеет пороговый характер. Порог возникновения течений U_0 не совпадает с напряжением перехода к нелинейному участку вольтамперной характеристики U_1 . Обычно $U_1 > U_0$. В режиме неразвитого течения наблюдается очень быстрый рост электрического числа Рейнольдса, в режиме развитого течения электрическое число Рейнольдса постоянно $Re_{el} = const$. Назовем это значение предельным Re_{el} . Наиболее ярко, особенности ЭГД-течений в неразвитом и развитом режимах различимы

на картах линий уровня скорости, восстановленных путём компьютерной обработки поля скоростей и представленных на рис. 4.12 (система электродов лезвие-плоскость в жидкости с уровнем низковольтной проводимости в 10^{-10} Сим/м). ЭГД-течения как в развитом, так и в неразвитом случае носит ламинарный, параллельно-струйный характер, центральная струя течения направлена от лезвиеобразного (активного) электрода к плоскому (пассивному).

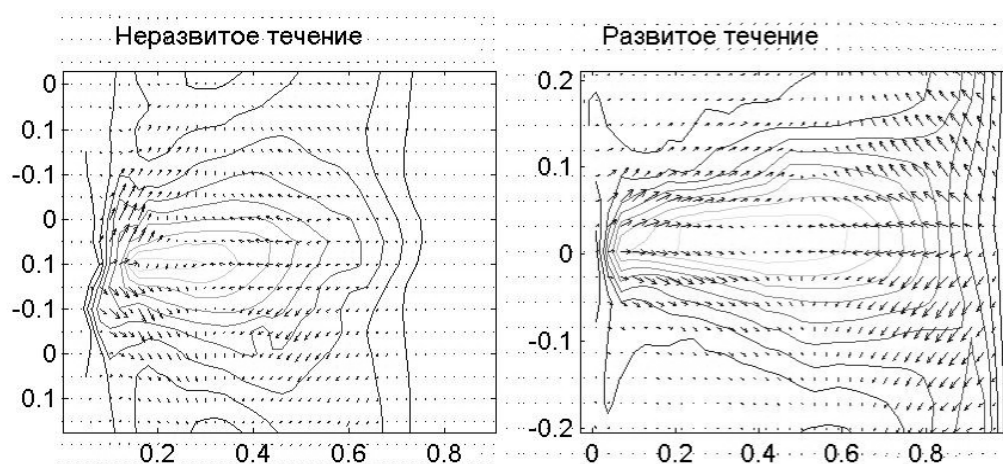


Рис. 4.13. Карты линий уровня скорости в центральной струе неразвитого и развитого ЭГД-течений. Стрелками показано векторное поле сил.

Область, занятую центральной струей ЭГД-течения, можно условно разделить на несколько зон. В непосредственной близости к электроду имеется тонкий прилипший слой относительно неподвижной жидкости. Он имеет характерную толщину в десятые доли миллиметра и виден в некоторых экспериментах. Этот слой, как правило, свободен от взвешенных в жидкости мелких визуализирующих частичек. В пределах этого слоя происходит проникновение т.е. «инжекция», ионов, образующихся у поверхности лезвиеобразного электрода в жидкость.

Далее следует короткая зона интенсивного ускорения жидкости электрическим полем, расположенная за неподвижным слоем. Эта зона лежит на уровне $0 \div 0,1$ и соответствует области концентрации линий уровня скорости (рис.4.13). В этой зоне векторы сил направлены преимущественно по течению, либо под острым углом к нему. В пределах этой зоны электрическая энергия ионов, формирующих избыточный заряд, преобразуется в кинетическую энергию жидкости. Далее следует зона плавно изменяющегося течения. Она, соответствует центральной его части. В пределах центральной струи линии тока течения близки к отрезкам параллельных прямых. Как видно из анализа векторных полей сил (рис.4.13) в этой области течения происходит изменение направления действующих на жидкость сил. Далее следует короткая зона торможения центральной струи ЭГД-течения. Непосредственно к поверхности противоэлектрода примыкает неподвижный приэлектродный слой жидкости. В пределах зоны торможения происходит уменьшение модуля скорости, а, следовательно, кинетической энергии течения, а также изменение направления течения и раздвоение центральной струи. Детальный анализ этих процессов будет проведён в главе 5, на основе анализа силовых процессов, происходящих в центральной струе течения.

Аналогичный эффект имеет место в режиме неразвитого ЭГД-течения: заряд центральной струи за время движения мигрирует и диффундирует в окружающую жидкость, что приводит к остановке струйки заряженной жидкости в середине межэлектродного промежутка. По мере повышения напряжения скорость движения заряженной струйки возрастает, и время пересечения жидкостью межэлектродного промежутка становится меньше времени релаксации заряда: $\tau = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \sigma$. Это соответствует переходу в режим развитого ЭГД-течения. В качестве безразмерного критерия этого процесса можно предложить число $\Gamma = l_0 \cdot \sigma / (v \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0)$, равное отношению времени пересечения жидкостью промежутка к времени релаксации τ , аналогом которого в неподвижной жидкости является число Р (см. главу 3), в котором вместо скорости жидкости стоит скорость движения ионов. Переход в режим развитого течения в данном примере, соответствует $\Gamma = 90$. Более глубокий анализ причин неразвитого ЭГД-течения, связанный со структурой приэлектродных ионизационно-рекомбинационных слоёв, приведён в следующей главе.

Исследование структуры ЭГД-течений при помощи PIV-метода [4.24,4.25].

Выше приведены результаты экспериментальных исследований структуры ЭГД-течений, полученные PTV-методом. Далее приводятся результаты исследований, проведённых при помощи метода лазерной анемометрии или т.н. PIV метода с использованием современной установки Flow Master от компании La Vision и усовершенствованной методики исследования динамических вольтамперных характеристик.

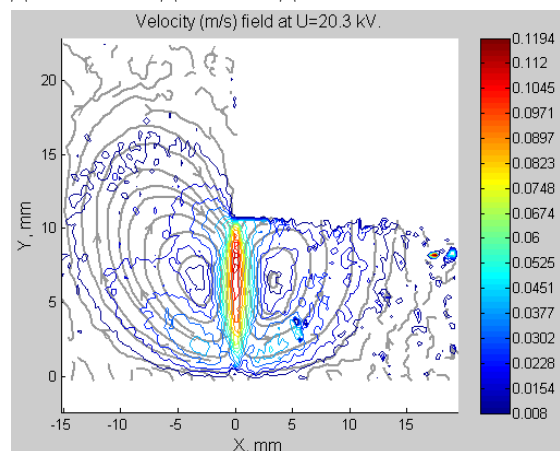


Рис.4.14 Мгновенные распределения скорости ЭГД-течений в кювете при напряжении кВ.

при различных напряжениях и двух полярностях лезвия в системе электродов лезвие - плоскость и проведён их анализ. На рис.4.14 приведены мгновенные распределения скорости ЭГД-течений в кювете при напряжении 10 кВ. Анализ мгновенных характеристик показал, что при приложении к электродам постоянного напряжения из диапазона 10-25 кВ от электрода-лезвия к плоскости возникает стационарный поток оливкового масла. В отличие от очищенного трансформаторного масла в данной жидкости не наблюдается существенных флуктуаций скорости центральной струи ЭГД-потока. Поля скоростей и линии тока жидкости для напряжений 1, 2, 8, 25 кВ при отрицательной полярности лезвия представлены на рис.4.15. В диапазоне малых (до пороговых) напряжений, наблюдается

В отличие от метода PTV, в котором скорость течения восстанавливалась по отдельным линиям тока жидкости, относящимся к различным временным слоям (кадрам), в настоящем подходе получаемые данные являются практически мгновенными снимками полного распределения скоростей во всем межэлектродном промежутке. Поэтому любые локальные и временные флуктуации скорости, связанные с неоднородным поступлением заряда в центральную струю, отражаются в структуре мгновенных снимков поля скоростей. В процессе проведения исследований было снято и обработано несколько сотен мгновенных распределений скорости

два очень медленных ($0,1\text{ м/с}$) потока: в верхней части кюветы локализовано течение, направленное вверх вдоль поверхности лезвия, а в нижней части расположен медленный микропоток от лезвия к противоэлектроду. Нижний микропоток обусловлен инъекцией с заострения, а верхний встречный поток обусловлен наличием неравновесного приэлектродного гетеро слоя в верхней части лезвия. Такая структура обусловлена неоднородным распределением напряженности поля по поверхности лезвия. При напряжениях выше 2 кВ, по мере усиления инъекции по всей поверхности лезвия встречное течение вдоль поверхности лезвия постепенно исчезает и остаётся только один поток, направленный от лезвия вниз. Подобная картина наблюдалась в системе игла-плоскость и описана выше. Это напряжение можно считать порогом возникновения ЭГД-течений инъекционного типа. Отметим, что для протяжённых электродов переход к инъекционному течению происходит в некотором диапазоне напряжений: в нашем случае 1-2 кВ. Инжекционный поток представляет собой узкую центральную струю, направленную от лезвия к противоэлектроду, в котором зона ускорения расположена под лезвиеобразным электродом и два возвратных вихря, расположенных слева и справа от плоскости симметрии течения. Поскольку кювета имеет ограниченный объем, то, по-видимому заряд, переносимый центральной струей, не полностью нейтрализуется на противоэлектроде и возвращается к лезвию, снижая поле у его поверхности. Следует заметить, что порог возникновения ЭГД-течений инъекционного типа не соответствует порогу возникновения инъекции. Дело в том, что инжектированные ионы рекомбинируют с ионами проводимости и не проникают в объем жидкости до тех пор, пока плотность тока инъекции не превысит плотность тока проводимости. Это было показано в главе 3 в параграфе «Инъекция в слабо проводящую жидкость», а также установлено в экспериментах по зондовому исследованию приэлектродных слоёв. Биполярная структура приэлектродных слоев в пред пороговом режиме свидетельствует о рекомбинации инжектированных ионов со встречным потоком противоположно заряженных ионов проводимости.

В диапазоне напряжений 1–2 кВ течение имеет неразвитый характер, при этом центральная струя, стартующая с электрода-лезвия, не доходит до противоэлектрода, а растекается в межэлектродном промежутке. При более высоких напряжениях центральная струя достигает противоэлектрода, а течение становится развитым. В развитом режиме при увеличении напряжения скоростная структура центральной струи остается неизменной, изменяется только величина средней скорости течения. Следует отметить, что усредненные распределения практически неотличимы от мгновенных. На линейных распределениях скорости отчетливо прослеживается зонная структура центральной струи ЭГД-течения. Она особенно отчетливо прослеживается на осевых и профильных распределениях скорости, представленных на рис.4.17. В режиме неразвитого течения непосредственно под электродом расположена короткая зона ускорения, сразу переходящая в зону торможения; в режиме развитого течения зона ускорения переходит в зону квази однородного течения, в пределах которой скорость вдоль линий тока практически не изменяется, Зона однородного течения занимает большую часть МЭП, и далее у противоэлектрода имеется зона торможения жидкости.

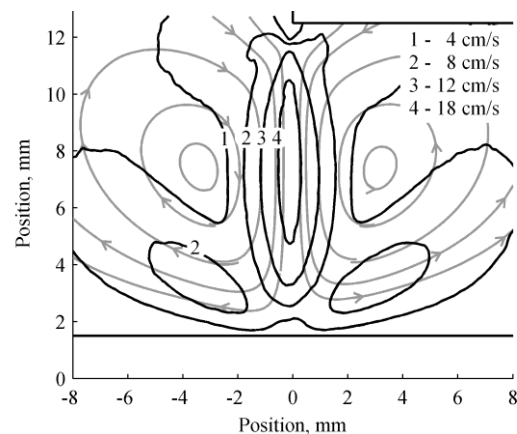
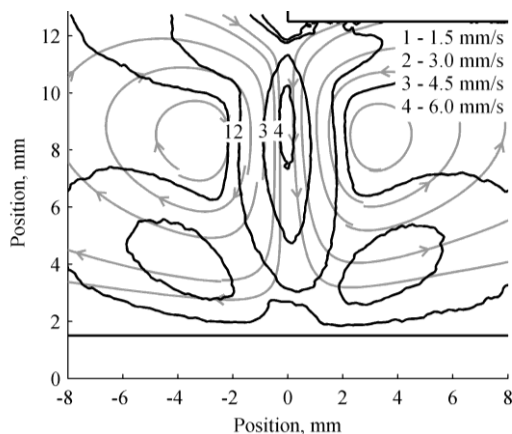
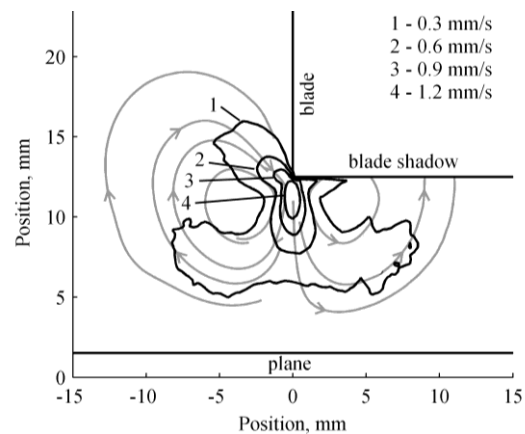
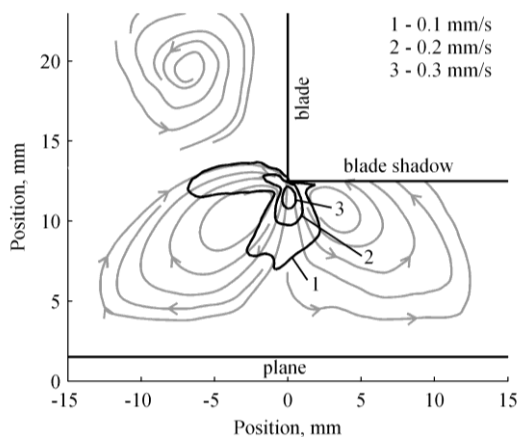


Рис. 4.15. Контурные графики скорости и линии тока ЭГД-течения при напряжениях -1 , -2 , -8 и -27 кВ.

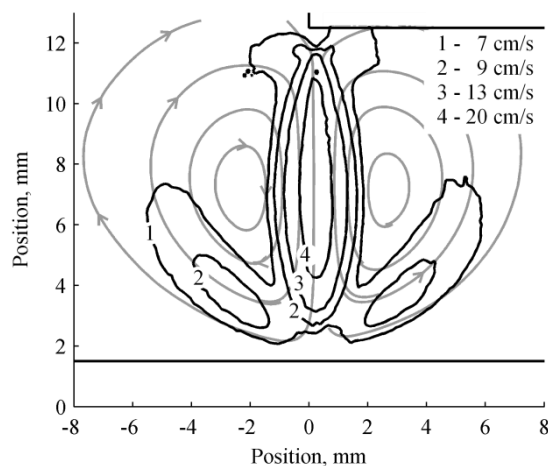
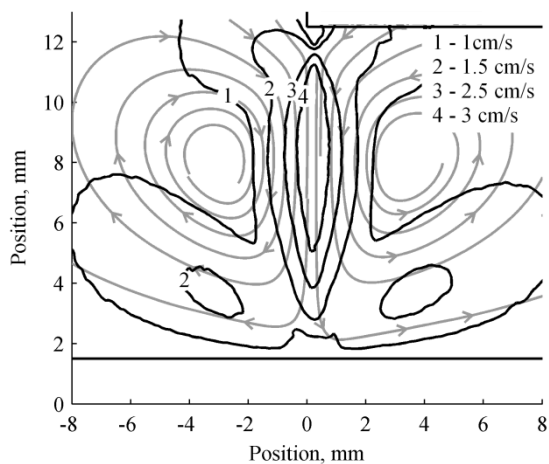


Рис. 4.16. Контурные графики скорости и линии тока ЭГД-течения при напряжениях $+23$ и $+27$ кВ.

На рис.4.17 (снизу) приведены профили скорости центральной струи на уровне центров завихрений при двух напряжениях. Экспериментальные точки для различных напряжений с хорошей точностью описываются единой зависимостью, носящей Гауссов характер. Профили скорости центральной струи при различных напряжениях практически совпадают, что свидетельствует о неизменной толщине силовой зоны течения, т.е. заряженной струйки, текущей от лезвия к плоскому электроду. Все распределения отлично воспроизводятся при повторении экспериментов.

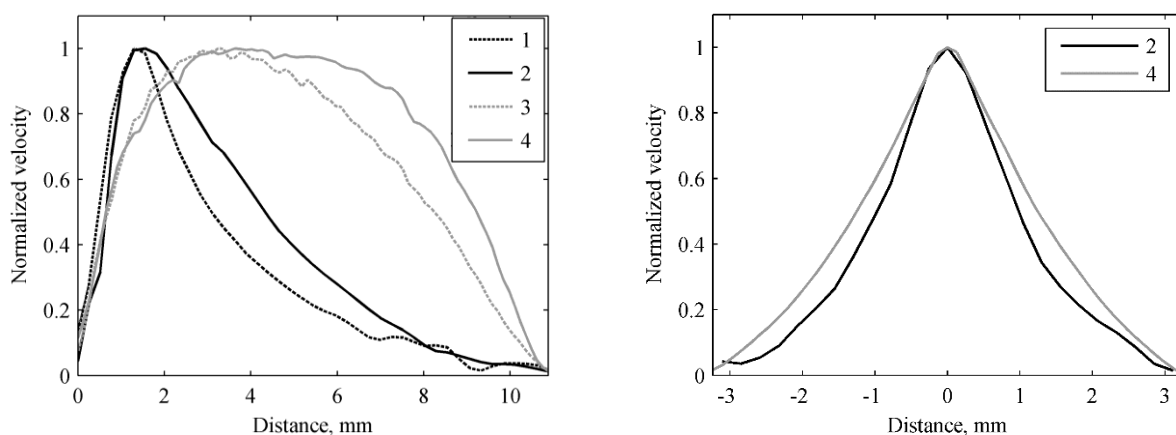


Рис. 4.17. Осевые графики и профили скорости центральной струи ЭГД-течения с разрешением 85 точек на график при напряжениях: 1 – 1 кВ, 2 – 2 кВ (неразвитое течение), 3 – 8 кВ и 4 – 27 кВ (развитое течение).

На рис.4.16 приведены карты линий уровня скорости при положительной полярности лезвиеобразного электрода. При изменении полярности лезвиеобразного электрода пороговый характер, два режима, а также зонная структура развитого ЭГД-течения практически не изменяется (см. рис.4.16). Судя по характеру осевых распределений скорости, в режиме развитого течения можно также говорить об инжекционном механизме образования заряда в приэлектродных реакциях.

Полученные PIV-методом данные имеют хорошее качественное совпадение с ранее полученными результатами при помощи PTV- метода для трансформаторного масла, представленными на рис.4.13. Это соответствие касается зоной структуры развитых ЭГД- течений, а также неизменности профилей скорости центральной струи. Для слабо проводящих жидкостей отмечается наличие выраженного участка квази однородного течения. На рис. 4.18 приведены зависимости средней безразмерной скорости (среднего электрического числа Рейнольдса) от напряжения, а также нормированная вольтамперная характеристика ячейки. Вид интегральных характеристик также имеет типовой характер: быстрый после пороговый рост электрического числа Рейнольдса сменяется выходом в насыщение в режиме развитого ЭГД-течения. На вольтамперной характеристике омический участок ВАХ переходит в высоковольтный нелинейный участок.

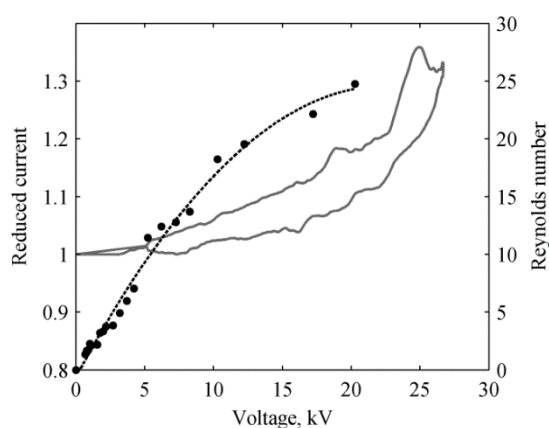


Рис. 4.18. Число Рейнольдса и приведенная динамическая вольтамперная характеристика.

Отмеченные структурные и интегральные особенности цен-

На рис.4.18 представлены приведенные ДВАХ кюветы, при положительной и отрицательной полярности лезвия при скорости изменения напряжения кВ/с. Ток нормирован на ток проводимости, поэтому начальный Омический участок ДВАХ лежит на уровне 1. Высоковольтный участок ДВАХ начинается при напряжении 3 кВ и имеет оригинальный гистерезис: ток роста напряжения выше тока спада напряжения. Это свидетельствует о неполной разрядке жидкости и наличии в объеме остаточного заряда. Зависимости среднего электрического числа Рейнольдса в центральной струе ЭГД-течения от напряжения имеет участок роста и далее переход к участку насыщения.

тральной струи ЭГД-течений в оливковом масле практически совпадают со структурными особенностями и интегральными характеристиками центральных струй инжекционных ЭГД-течений в трансформаторном масле с примесями бутанола, полученными РТВ-методом и описанными ранее. Это касается режимов неразвитого и развитого ЭГД-течений, неизменности зонной структуры развитого течения в широком диапазоне напряжений, характера интегральных характеристик ЭГД-течений.

Выводы

Приведенные ранее выводы о структуре и режимах ЭГД-течений подтверждаются результатами систематических исследований ЭГД-течений, проведенных РIV-методом на современной установке. Достоверность исследований обеспечена невысокой погрешностью измерений в области интереса, хорошей воспроизводимостью результатов и обширной базой полученных данных. Структурные особенности ЭГД-течений инжекционного типа обусловлены оригинальной зарядовой структурой центральной струи и носят универсальный характер, т.е. касаются не только трансформаторного масла, но и иных диэлектрических жидкостей с невысоким уровнем низковольтной проводимости. Характер полученных данных свидетельствует об инжекционном механизме образования заряда в оливковом масле. Высокая интенсивность инжекции в оливковом масле по-видимому обеспечивается наличием естественной электроноакцепторной (донорной) примеси в жидкости.

Выявленные в процессе экспериментов различия ЭГД-течений в разных условиях касаются в основном размеров и характера описанных зон. ЭГД-течения инжекционного типа носят пороговый характер. Переход в режим развитого ЭГД-течения осуществляется путем резкого возрастания относительной скорости ЭГД-течения и электрического числа Рейнольдса. В режиме развитого течения, как правило, выполняется условие $Re_{эл} > 10$. Поэтому влияние миграционной составляющей тока ослабевает и структура зоны ускорения несколько иная. Зона ускорения развитого течения более протяженная, вектора ускорения направлены вдоль оси симметрии течения коллинеарные линиям тока, незначительная расходимость появляется дальше по ходу течения на уровне $0,1 \div 0,2$, составляющая ускорений в направлении течения существенно выше, чем в режиме неразвитого течения. Эти особенности, связаны с выносом объемного заряда из приэлектродных областей и формированием центральной заряженной струйки, пересекающей межэлектродный промежуток. При этом решающую роль играют объемные Кулоновские силы.

Зависимость структуры ЭГД-течений от степени неоднородности электрического поля [4.9].

Следующая группа исследований проводилась для выявления различий структуры ЭГД-течений в сильно- и слабо неоднородных электрических полях. Как уже отмечалось, некоторые исследователи пытаются разделить ЭГД-течения на два класса, обособив течения в сильно неоднородных полях от течений в слабо неоднородных полях. Структура объемного заряда в центральной струе ЭГД-течения, а, следовательно, и динамика течения в тех или иных условиях обусловлены вполне конкретным механизмом электризации, определяющим кинематику течения. Следовательно исследуя кинематическую структуру ЭГД-течения в слабо- и сильно неоднородных полях, можно выявить различия, присущие тому или иному механизму электризации среды.

Основные исследования зависимости структуры ЭГД-течений от степени неоднородности электрического поля были проведены для системы электродов провод над пластиной размерами $4,5 \times 1 \text{ см}^2$ в кювете из плексигласа. В качестве активного электрода использовались медные цилиндрические провода диаметром 0,05; 0,5; 1; 3 и 4 мм, цилиндрический стержень диаметром 20 мм, платиновая нить диаметром $3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ и режущая часть лезвия бритвы (сталь) толщиной 0,08 мм. Широкий набор электродов позволил изменять приэлектродную напряженность электрического поля и плотность тока на активном электроде в пределах трех–четырех порядков. Например, при напряжении 10 кВ напряженность электрического поля у поверхности цилиндрического электрода, рассчитанная в электростатическом приближении, с изменением его диаметра от 2 см до $3 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ изменялась от $1,7 \cdot 10^4$ до 10^7 В/см ; у поверхности цилиндра диаметром 2 см она всего лишь в 2,5 раза больше, чем в системе плоскопараллельных электродов. Таким образом, охватываются ЭГД-течения в диапазоне от сильно неоднородных полей до близких к однородному. В качестве цилиндрического электрода использовались поочередно все перечисленные электроды, продольная ось цилиндров устанавливалась параллельно нижнему электроду. Во всех экспериментах этой серии верхний электрод отрицателен, межэлектродное расстояние составляло 1,5 см, использовался раствор йода в трансформаторном масле с концентрацией йода 10^{-4} г/см^3 . Выборочные исследования проведены для электродов типа игла-плоскость в вазелиновом трансформаторном масле, а также в ряде других жидкостей: полиметилсилоксане, касторовом масле, изооктане.

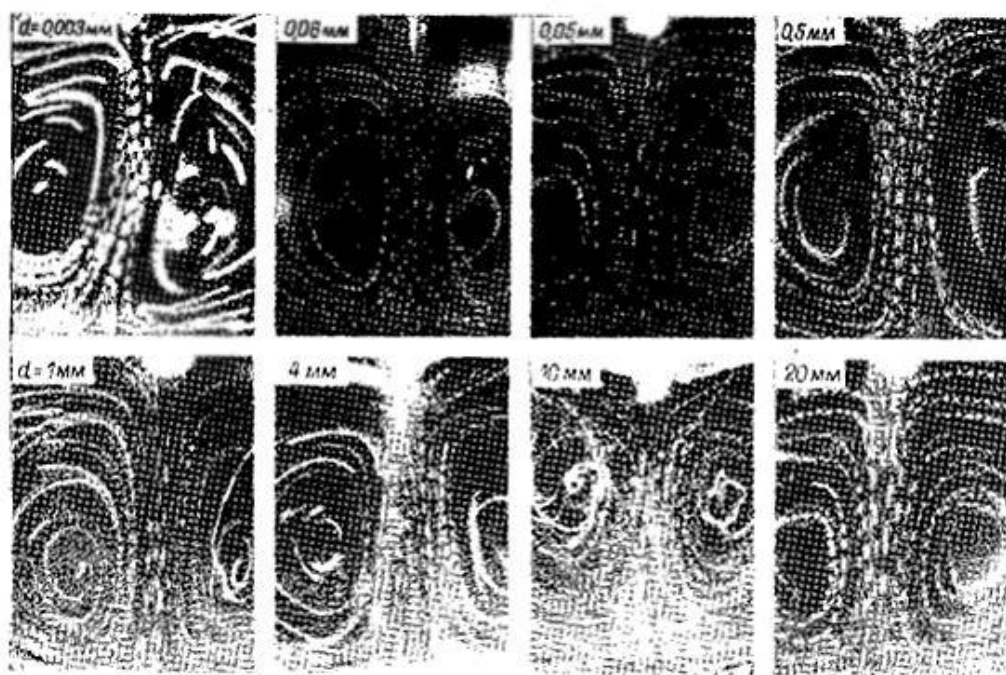


Рис. 4.19. Фотографии центральных струй ЭГД-течений от электродов разных размеров.

На рис.4.19 представлены фотографии развитых ЭГД-течений от электродов разных размеров. Видно, что все течения, независимо от размеров активного электрода, имеют типовой характер: от активного электрода к плоскому распространяется относительно тонкая струйка заряженной жидкости. Поперечные размеры центральной струйки слабо зависят от размеров активного электрода, а определяются размером приэлектродных

ионизационно-рекомбинационных слоев. Если единицей измерения положить радиус активного электрода, то в относительных единицах ширина центральной струйки существенно различна: для электрода микронных размеров она много больше размеров электрода, а для электрода диаметром 2 см, она несколько ниже размеров электрода. Профили скорости от электродов различных размеров, также слабо отличаются друг от друга.

Были проведены эксперименты по визуализации ЭГД-течений на полутеневой установке при слабом охлаждении поверхности активного электрода показавшие, что непосредственно от поверхности электрода вдоль срединного слоя центральной струи развивается тонкая струйка охлажденной жидкости. Поперечные размеры этой струйки значительно меньше поперечных размеров ЭГД-потока. Заряд струйки у поверхности электрода соответствует заряду приэлектродных областей.

Электрическое число Рейнольдса в режиме развитого ЭГД-течения обычно не меньше 10. Таким образом, уширение заряженной струйки за время пересечения межэлектродного промежутка незначительно.

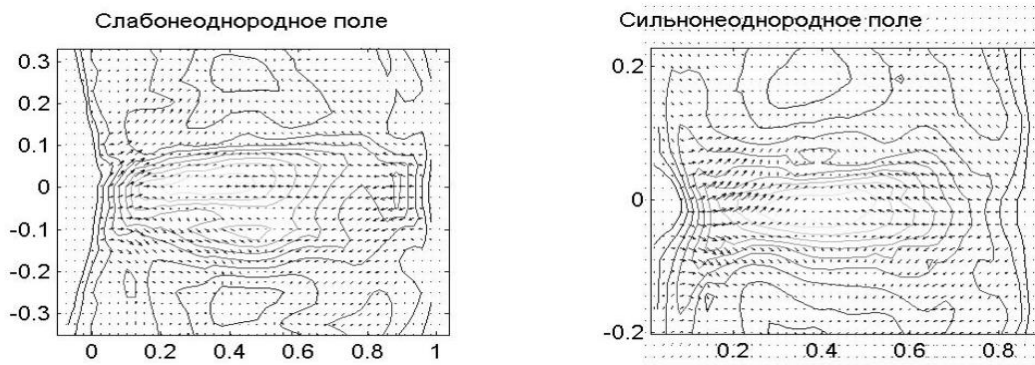


Рис.4.20. Карты линий уровня скорости центральных струй ЭГД-течений в слабо неоднородном и сильно неоднородном электрическом поле, стрелками показаны векторные поля сил.

На рис.4.20 представлены карты линий уровня скорости для центральных струй ЭГД-течений в слабо и сильно неоднородных полях, диаметр цилиндрического электрода 20 и 0,5 мм, низковольтная проводимость жидкости 10^{-12} Сим/см, напряжение – 10 кВ, ЭГД-течения носят развитый характер. На картах линий уровня скорости стрелками нанесены векторные поля ускорений. Видно (рис.4.20), что ЭГД-течения в слабо и сильно неоднородном полях имеют зонную структуру. Однако структура линий уровня скорости в слабо неоднородном поле существенно асимметрична относительно середины межэлектродного промежутка, в сторону более протяженной зоны торможения жидкости. Это особенно отчетливо наблюдается на векторных полях ускорения: зона ускорения в слабо неоднородном поле несимметрична и выражена менее четко, чем в сильно неоднородном. Зона торможения в слабо неоднородном поле также несимметрична относительно центральной оси течения и более размыта, чем в сильно неоднородном.

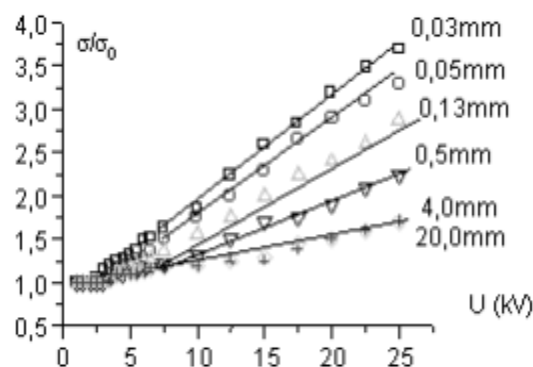


Рис. 4.21. Вольтамперные зависимости

На рис.4.21 представлены в безразмерном виде вольтамперные зависимости при разных

диаметрах активного электрода. Видно, что зависимости (рис.4.21) сохраняют типовой характер при изменении размеров активного электрода в пределах четырех порядков величины. Следует отметить также, что все особенности режимов неразвитого и развитого ЭГД-течений также имеют место, различия касаются лишь величин предельного электрического числа Рейнольдса Re_{np} и коэффициента высоковольтной проводимости K .

На рис.4.22 представлены зависимости предельного электрического числа Рейнольдса Re_{np} от напряжения, а также коэффициента K от относительного радиуса активного электрода. Экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на аппроксимационные зависимости типа: $K \sim \ln(l_0/r)$, а $Re_{np} \sim \ln(l_0/r)$. Известно, что для системы цилиндр над плоскостью распределение потенциала описывается функцией $\varphi = \varphi_0 \cdot \ln(l_0/r)$, r – расстояние от оси цилиндра.

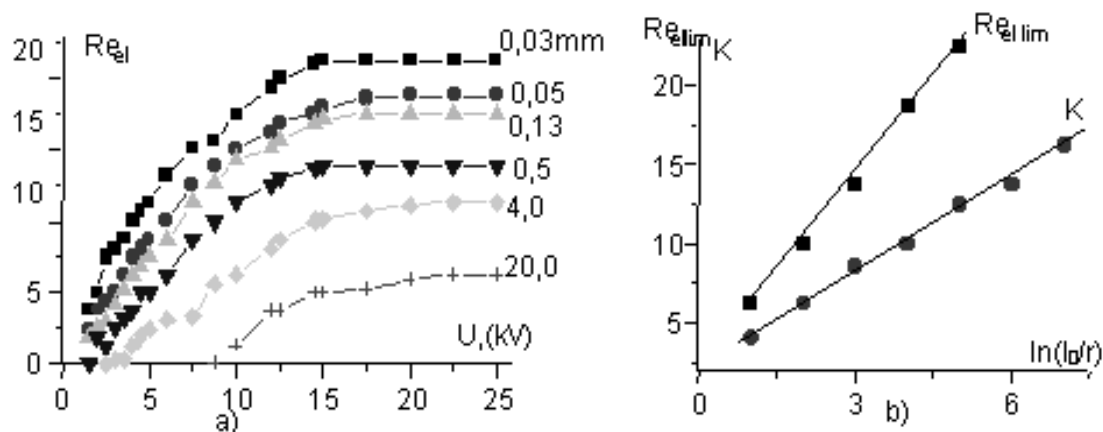


Рис.4.22. Зависимости предельного электрического числа Рейнольдса Re_{np} от напряжения и коэффициента высоковольтной проводимости K от относительного радиуса активного электрода.

В режиме сильной инжекции в режиме развитого ЭГД-течения влияние объемного заряда столь существенно, что приводит к снижению напряженности поля в приэлектродной области, и поэтому максимум действующих сил перемещается от электрода в объем жидкости. Объемный заряд может кардинально повлиять также и на распределение электрического поля в жидкости.

Анализ представленного материала показывает, что, во-первых, кинематическая, а следовательно, и динамическая структура центральной струи ЭГД-течения сохраняются при изменении размеров активного электрода в широких пределах, во-вторых, сохраняется поведение интегральных характеристик течения. Это значит, что механизм зарядообразования в исследованных жидкостях не зависит от размеров активного электрода, и, следовательно, нет оснований разделять явления "электрического ветра" и изотермической ЭГД-конвекции, приписывая им различную природу. Структурные и интегральные характеристики ЭГД-течений, возникающих от электродов разного диаметра, отражают особенности инжекционного механизма зарядообразования.

Анализ зонной структуры ЭГД-течения в различных условиях показывает, что ион, получивший электрический заряд на поверхности электрода, в пределах неподвижной приэлектродной зоны движется относительно жидкости со скоростью, определяемой низковольтной подвижностью иона, формируя вокруг себя некую надмолекулярную структуру, обеспечивающую в дальнейшем повышенную степень его взаимодействия с молеку-

лярным окружением. Далее ион разгоняет окружающую нейтральную жидкость в пределах зоны ускорения. Величина средней электрогидродинамической подвижности $Re_{эл}$, определяемая как отношение средней скорости жидкости v к средней скорости движения ионов относительно жидкости $b \cdot E$, в центральной струе ЭГД-течения составляет 10-20 т.е. вне зоны ускорения ионы практически «вморожены» в жидкость. "Присоединенную массу" отдельного иона можно оценить, приравнявая в зоне ускорения силы инерции электрическим силам: $\rho E \sim \gamma \partial V / \partial t$, здесь ρ , E , γ , V – соответственно, объемный заряд, напряженность электрического поля, плотность жидкости и скорость ЭГД-течения. Отношение $\rho/\gamma \sim E^{-1} \partial V / \partial t$ можно оценить, среднее ускорение в пределах зоны разгона лежит в диапазоне $1 \div 10$ м/с², средняя напряженность электрического поля 10^6 В/м, плотность жидкости 800 кг/м³. Отношение ρ/γ в центральной струе течения равно 10^{-5} Кл/кг, что соответствует присоединенной массе в $(0,2 \div 2) \cdot 10^{-14}$ г в расчете на единичный однозарядный ион. Масса молекул углеводородных масел лежит в пределах $(3 \div 5) \cdot 10^{-25}$ кг. Следовательно, в зоне ускорения каждый ион достаточно жестко связан с дальним сольватным окружением, содержащим $(0,5 \div 5) \cdot 10^{10}$ молекул жидкости. Повышенное ион-молекулярное взаимодействие приводит к весьма высокому коэффициенту преобразования электрической энергии ионов в кинетическую энергию жидкости.

Рассмотрим некоторые интегральные характеристики ЭГД-течений: зависимости средней скорости течения и тока через жидкость от напряжения на электродах. Как правило экспериментальные данные в режиме развитого ЭГД-течения достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью скорости от приложенного напряжения: $V = k \cdot U$ ($Re_{эл} = V/b \cdot E = \text{const}$), соответствующие участки вольтамперных зависимостей имеют параболический характер: $I = k \cdot U^2$.

Поскольку плотность электрического тока в режиме развитого течения равна сумме миграционной и конвективной компонент: $j \cong \rho \cdot (V + bE)$ и конвективная компонента как правило преобладает, то можно считать, что полная плотность тока определяется конвективной составляющей $j \cong \rho V$. Принимая во внимание квадратичный характер вольтамперной характеристики можно сделать вывод, что плотность инжектируемого заряда $\rho \sim U$. Учитывая предшествующие соображения о жестком ион-молекулярном взаимодействии и, следовательно, малых Джоулевых потерях, можно приравнять среднюю плотность электрической и кинетической энергий в центральной струе ЭГД-течения на уровне центра межэлектродного расстояния: $e \cdot E^2 \sim \gamma V^2 / 2$, откуда $V \sim 2E (e/\gamma)^{0.5}$. Тогда, считая, что напряженность поля в рассматриваемой части центральной струи пропорциональна ее среднему значению $E \sim U/2$, получим $V \sim U$, наблюдающееся в экспериментах.

В заключении можно выделить некоторые основные результаты о структуре ЭГД-течений инжекционного типа:

1. ЭГД-течения имеют пороговый характер, пороговое напряжение определяется равенством плотности токов проводимости и инжекции в приэлектродных областях.
2. Центральные струи ЭГД-течений инжекционного типа в ограниченных объемах имеют типовую зонную структуру: короткую зону ускорения, лежащую за инжектирующим электродом, зону однородного (квазиоднородного) течения и зону торможения у плоского электрода, непроницаемого для жидкости.
3. Конкретизированы особенности режима неразвитого и развитого ЭГД-течений. В режиме развитого течения плотность инжектируемого заряда пропорциональна напряжению на электродах, а высокое ион-молекулярное взаимодействие в центральной

струе течения проявляется, по-видимому, за счет формирования надмолекулярных структур.

4. Анализ кинематической структуры ЭГД-течений в сильно и слабо неоднородных полях показывает, что они имеют единую природу – инжекция (приэлектродные реакции) на проволочном электроде.

Влияние примесного состава жидкости на кинематику ЭГД-течений [4.18 – 4.21].

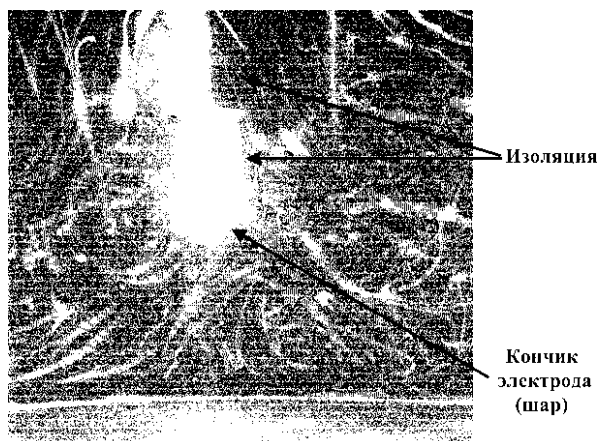


Рис. 4.23 Фотография ЭГД-течения в очищенном вазелиновом масле при напряжении 25 кВ.

В процессе исследования установлено, что ЭГД-течения в очищенных жидкостях либо исчезают вообще, если уровень низковольтной проводимости жидкости, составляет менее чем 10^{-13} См\м, а, следовательно, и концентрация примесей крайне невелика, либо носят, как правило, неустойчивый характер, т.е. испытывают существенные временные флуктуации. Отсутствие примесей приводит к снижению уровня инжекции, а, следовательно, и уровня инжектированного объемного заряда. Если плотность объемного заряда становится меньше определенного уровня, то расстояния между отдельными ионами ста-

новятся большими, а степень ион молекулярного взаимодействия падает. Все эти факторы приводят к существенному ослаблению возникающих в жидкости ЭГД-течений.

Так, например, в хорошо очищенном вазелиновом масле (см. рис. 4.23) в системе электродов игла над плоскостью жидкость остается неподвижной вплоть до напряжений в 20 кВ/см. При более высоких напряжениях возникающее ЭГД-течение хаотично и крайне нестабильно во времени. Это касается в равной мере скоростных и токовых характеристик ЭГД-течений. Обычно как мы видели из фотографий и видеозаписей, центральная струя осесимметричных течений в среднем направлена вдоль оси, соединяющей активный и пассивный (плоский) электроды. Однако при малой проводимости она хаотически флуктуирует относительно основного направления. Течения приобретает многоячеистый характер и напоминает отдельные хаотические выбросы микро областей заряженной жидкости из около электродного пространства. Исследование таких течений крайне затруднительно.

Введение примесей, обладающих электронно-донорными (акцепторными) свойствами в очищенные жидкости стабилизирует и существенно интенсифицирует как токи, протекающие через жидкость, так и ЭГД-течения. Так, например, растворение йода в вазелиновом масле снижает пороговое напряжение до 1-5 кВ и существенно интенсифицирует возникающие ЭГД-течения. Поэтому основные исследования кинематики ЭГД-течений проводились в хорошо очищенных диэлектрических жидкостях с введенными известными примесями. В качестве основных примесей использовались примеси йода и бутанола. Однако отдельные эксперименты проведены в технических жидкостях, примесный состав которых оставался неизвестным. Следует отметить, что состав основной диэлектрической

жидкости имеет значительно менее существенное значение и влияет в основном на вязкость, а, следовательно, и на подвижность ионов. Кроме растворов йода и бутилового спирта были исследованы также растворы более сложного состава такие как: двойные растворы йода и бутилового спирта, бутилового спирта и олеиновой кислоты, йода и ацетона, а также растворы бутилового спирта в касторовом масле и дихлорэтано.

ЭГД-течения в растворах йода

Растворы йода в очищенном трансформаторном масле исследовались сравнительно в узком интервале концентраций йода. Эти концентрации изменяли низковольтную проводимость растворов в диапазоне :1 - 50 / х 10⁻¹² Ом⁻¹м⁻¹. При более высоких концентрациях йода растворы становятся оптически непрозрачными, что не позволяет использовать применявшийся метод визуализации. Весь исследованный интервал был разбит на пять равных частей, исследования проводились в пяти растворах, различающихся концентрацией растворенного йода. Исследования проводились для электродов лезвие-пластина при межэлектродном расстоянии 1,5 см. Для каждой жидкости исследование проводилось в интервале напряжений 1 – 30 кВ.

Анализ структуры ЭГД-течений в растворах йода показал, что ЭГД-течения в растворах различных концентраций реализуются в виде центральной струи и двух возвратных потоков, направленных к лезвиеобразному электроду. Кинематические характеристики центральной струи ЭГД -течений в растворах йода различных концентраций в пределах погрешности измерений совпадают и соответствуют типовым, рассмотренным в предыдущей главе. Зонная структура центральной струи сохраняется: у лезвиеобразного электрода присутствует зона ускорения, зона однородного течения и зона торможения. Профили скорости в центральной струе также имеют также типовой характер. Изменение концентрации йода влияет лишь на интегральные характеристики течения – расход жидкости в центральной струе, т.е. среднюю скорость ЭГД-течения и среднюю плотность избыточного объемного заряда в ней.

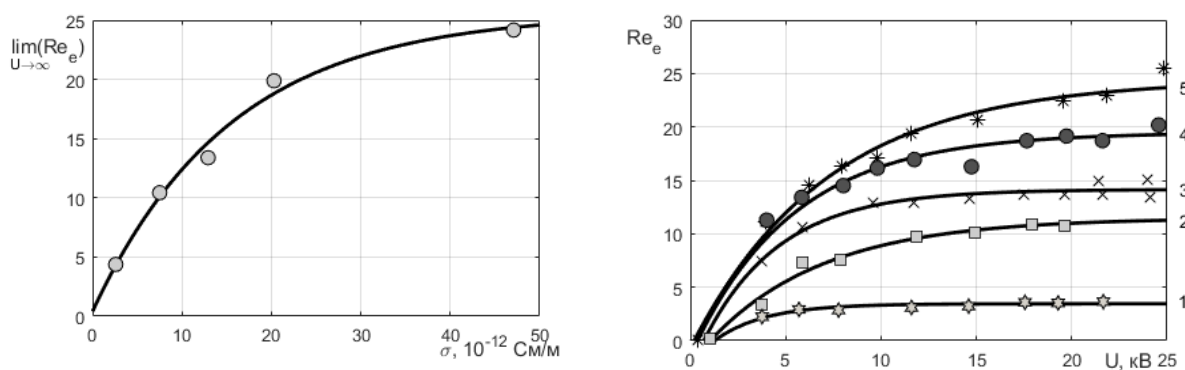


Рис.4.24. Зависимость электрического числа Рейнольдса от напряжения в растворах йода (справа), зависимость предельного Re_e от проводимости(слева).

На рис.4.24 (справа) приведены зависимости относительной средней скорости в центральной струе (в качестве единицы измерения скорости выбрана средняя скорость движения ионов – т.е. среднего электрического числа Рейнольдса от напряжения в растворах с различными концентрациями йода. Для наглядности экспериментальные точки, относящиеся к каждой концентрации раствора, объединены плавными линиями. Видно, что

все зависимости имеют типовой вид: течения имеют порог, начальный участок быстрого роста Re_e

сменяет участок насыщения. Как уже отмечалось ранее, участок насыщения соответствует режиму развитого ЭГД – течения. Предельное электрическое число Рейнольдса $Re_{пр}$, зависит от концентрации йода, как показано ранее, пропорционально средней плотности объемного заряда в струе ЭГД-течения.

На рис. 4.24 (слева) приведена зависимость предельного электрического числа Рейнольдса от низковольтной проводимости (концентрации примесей). Видно, что при изменении концентрации йода предельные значения относительной скорости, а, следовательно, и средняя плотность объемного заряда в струе возрастают существенно. Однако при высоких концентрациях примеси зависимость обнаруживает тенденцию к насыщению. Таким образом интенсивность инжекции возрастает не беспредельно, а имеет некоторые ограничения. Как будет показано в следующей главе эти ограничения связаны с частичной рекомбинацией инжектируемых ионов в неравновесных рекомбинационных слоях и ограничением интенсивности инжекции объемным зарядом жидкости. К сожалению, не удается исследовать свойства ЭГД-течений в растворах йода более высоких концентраций, т.к. с ростом концентрации растут свето поглощающие свойства растворов и визуализирующие частички становятся невидимыми.

ЭГД-течения в растворах бутилового спирта.

Другой примесью, обладающей повышенными электронно-акцепторными свойствами, является бутиловый спирт. Эта примесь практически не изменяет свето поглощающих свойств раствора и позволяет исследовать растворы более высоких концентраций. Как показали исследования низковольтной проводимости, степень самодиссоциации бутанола также ничтожна, т.е. примесь присутствует в растворе в основном в молекулярном виде и влияет на интенсивность реакций приэлектродного зарядообразования, а именно интенсивность инжекции на катоде. Далее приведены результаты исследований ЭГД-течений в растворах бутилового спирта в трансформаторном масле. Как уже было показано в главе 2, растворение бутанола в трансформаторном масле изменяет проводимость исходной диэлектрической жидкости в пределах пяти порядков, до $10^{-7} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ при концентрации бутанола в 30 %, т.е. до величины, ограничивающей класс “жидких диэлектриков” сверху. Течения исследовались для системы электродов лезвие/сталь/ -платина/медь/, а также проволочка медь диаметром 0,15 мм – пластина/медь/. Площадь медной пластины составляла $10 \times 2,7 \text{ см}^2$. Величина межэлектродного промежутка составляла 1-2 см. и указана на рисунках. Диапазон исследованных напряжений перекрывал 0,5 – 50 кВ от порога и до пробоя. Величина порогового и пробивного напряжения зависела от концентрации бутанола. При обработке видеок кадров и фотографий внимание концентрировалось в основном на области центральной струи течения. Здесь измерялась средняя скорость течения, по некоторым кадрам строились профили и осевые распределения скорости в центральной струе течения.

Оказалось, что структура центральных струй, возникающих ЭГД-течений во всех исследованных жидкостях имеет типовую зонную структуру, а профили скорости в центральной струе близки друг к другу. Различия касаются лишь размеров зон. Так с увели-

чением концентрации бутанола наблюдается тенденция к сокращению зона ускорения, при высоких концентрациях увеличивается зона торможения.

На рис. 4.25 (слева) приведена зависимость приведенного тока от напряжения (ВАХ) а справа зависимость предельных электрических чисел Рейнольдса, при напряжении 15 кВ от логарифма относительной низковольтной проводимости. Поскольку вязкость растворов изменяется слабо, то эта зависимость соответствует зависимости концентрации бутанола в растворах. Зависимость имеет выраженный экстремум в диапазоне проводимостей 10^{-10} – 10^{-9} Ом $^{-1}$ м $^{-1}$.

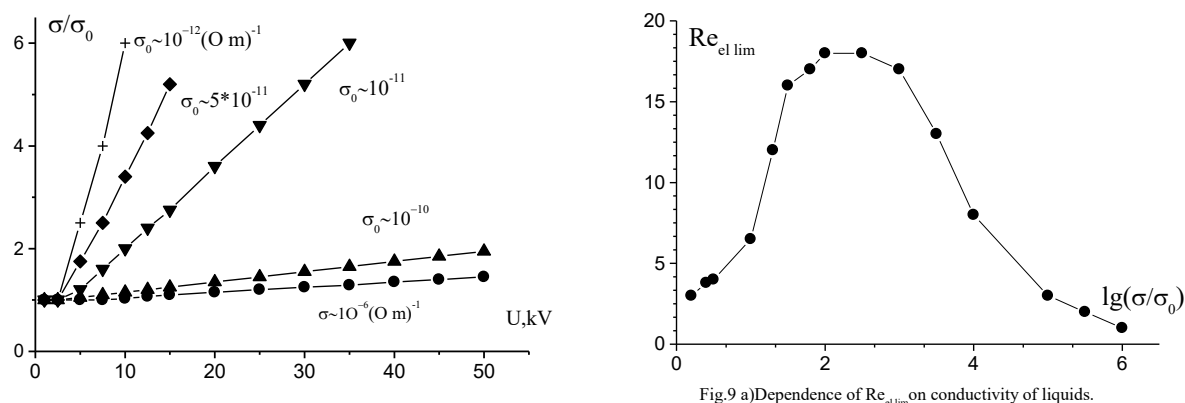


Рис. 4.25. Вольтамперные характеристики жидкостей различной проводимости в приведенном виде (а), $\sigma_0 = 10^{-12}$ Сим/м, зависимость $Re_{пр}$ от проводимости жидкости. Единица измерения проводимости равна 1 пСм/м.

На начальном участке, также, как и в растворах йода, значения предельных электрических Рейнольдсов $Re_{пр}$ быстро (практически линейно) возрастают с концентрацией бутанола. Однако при концентрациях в 10% рост прекращается и далее наблюдается спад электрического Рейнольдса при увеличении концентрации примеси. Этот аномальный участок по-видимому связан с рекомбинацией инжектируемых ионов в неравновесных приэлектродных слоях и будет проанализирован далее в главе 5. Приведенные ВАХ имеют типовой характер: низковольтный участок на котором низковольтная проводимость постоянна, и высоковольтный на котором приведенная проводимость линейно зависит от напряжения. Угол наклоны высоковольтного участка уменьшается с ростом концентрации бутанола. Видно, что в растворах повышенной проводимости инжекция практически не изменяет низковольтную проводимость на высоковольтном участке, тогда как в жидкостях с уровнем проводимости 1-100 пСм/м влияние инжекции очень существенно.

Влияние характера примесей на интенсивность ЭГД-течений в изооктане [4.23].

В следующей серии экспериментов для исследования влияния примесного состава на интенсивность инжекции на катоде и интенсивность возникающих ЭГД-течений был испробован широкий ряд веществ, обладающих повышенным сродством к электрону. В качестве основы выбран изооктан. Примеси подбирались таким образом, чтобы они растворялись в исходной жидкости и обладали повышенным сродством к электрону. В таблице 4.1 приведены характеристики растворов использованных веществ, значения низковольтной проводимости измерены в ячейке с плоскопараллельными латунными электродами. Только первые пять из исследованных примесей существенно повлияли на скоростные характеристики ЭГД-течений. Известно, что среди элементов периодической системы

Менделеева повышенным сродством к электрону обладают элементы 7-группы, содержащие семь электронов во внешней оболочке.

Таблица 4.1

Жидкость	Проводимость(Ом см) ¹	Примечания
Изооктан чистый	5×10^{-15}	
Изооктан + бутиловый спирт	$5,7 \times 10^{-13}$	C_4H_9OH
Изооктан + лейцин	3×10^{-12}	$(CH_3)_2CH-CH_2-CH-COOH NH_2$
Изооктан +тетрабромэтилен	3×10^{-13}	$Br(OH)_4$
Изооктан + йодное олово	10^{-12}	$S_n J_2$
Изооктан + йод	3×10^{-12}	Раствор оптически не прозрачен
Изооктан + йодистый аммоний	3×10^{-14}	Растворяется плохо
Изооктан + монохлоргидрин-глицерин	5×10^{-15}	Плохо растворяется
Изооктан +фенолфталеин	5×10^{-15}	Плохо растворяется
Изооктан + камфорная кислота	5×10^{-15}	Плохо растворяется
Изооктан + изопропиловый эфир масляной кислоты	2×10^{-12}	Плохо растворяется
Изооктан + трифенил хлорметан	3×10^{-14}	Плохо растворяется
Изооктан + фруктоза	2×10^{-15}	Плохо растворяется

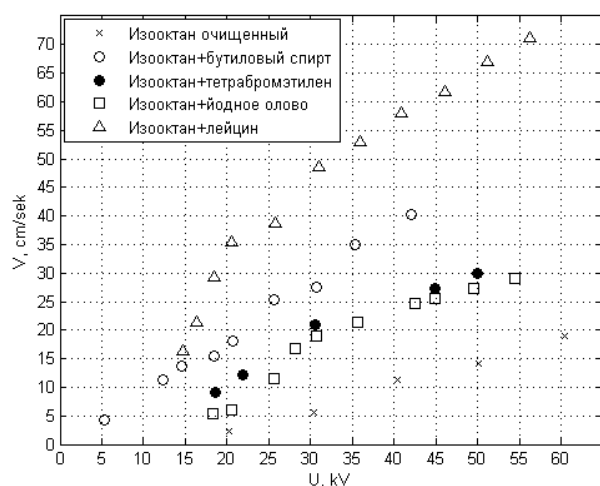


Рис. 4.26. Зависимость средней скорости в центральной струе ЭГД-течения от напряжения для различных примесей в изооктане.

Как известно соли имеют ионную кристаллическую структуру и при растворении наиболее легко диссоциируют с образованием в растворе ионов. Поэтому исследование раствора соли позволяет наиболее отчетливо оценить роль термической самодиссоциации, в том числе под влиянием поля (эффекта Вина) в процессах ионообразования. При выборе примесей определяющую роль играли также степень их растворимости в изооктане и способности изменять его низковольтную проводимость.

В первой серии экспериментов исследовалось влияние примесного состава жидкости на среднюю скорость ЭГД-течений и проводимость ячейки.

Материал /медь/ и геометрия электродов оставались неизменными. ЭГД-течение в растворах изооктана реализовалось в виде центральной струи, направленной от проволоочного

Наиболее приемлемыми, растворяющимися в неполярных растворителях являются галогены: фтор /3,4 эВ/, хлор /3,8 эВ/, йод /3,2 эВ/. Сродство к электрону химических соединений изучено значительно хуже. В некоторых соединениях величина сродства к электрону определяется наличием гидроксильной группы ОН-сродство /2,7: 2,6 эВ/, аминогруппы NH₂ /1,2 эВ/ и др. Поэтому в числе примесей, обладающих повышенными электронно-акцепторными свойствами выбраны йод, бутиловый спирт, α -лейцин, тетрабромэтилен. В качестве одной из примесей выбрана соль – йодное олово.

электрода к плоскому, образующей две типичные замкнутые ячейки в межэлектродном промежутке. Кинематика ЭГД-течения в общих чертах соответствовала кинематике ЭГД-течения в растворах бутилового спирта в трансформаторном масле. На рис.4.26 приведены зависимости средней скорости ЭГД-течения в центральной струе от напряжения. Различными точками на рисунке обозначены результаты измерений в различных растворах: изооктане чистом, растворах йодного олова, тетрабромэтилена, лейцина и бутилового спирта в изооктане. В режиме развитого ЭГД-течения зависимости в исследованных растворах, также, как и в исследованных ранее растворах на основе трансформаторного масла близки к линейным. В лейцине йодном олове наблюдается небольшая тенденция к насыщению.

Наименее интенсивными ЭГД-течения оказались в чистой жидкости, наиболее интенсивными в растворе лейцина в изооктане. Так, например, при напряжении 40 кВ скорость течения в чистой жидкости составляет 12 см/сек, а в растворе α -лейцина в пять раз больше – 60 см/сек. Следует отметить, что зависимость от локальной напряженности поля в приэлектродной области, значительно слабее. Так, например, по приведенным выше результатам исследования зависимости скорости ЭГД-течений от размеров электрода в трансформаторном масле при изменении диаметра электрода от $3 \cdot 10^{-3}$ до 3 мм, скорость ЭГД-течения изменялась не более чем в два раза. Столь существенное возрастание скорости при введении примесей, обладающих повышенными электронно-акцепторными свойствами, свидетельствует об определяющей роли инжекции (поверхностного ионообразования на границе электрод-жидкость) в процессах возникновения ЭГД-течений.

Ранее были приведены данные о влиянии концентрации растворенного йода на интенсивность ЭГД-течений в трансформаторном масле. Как видно из таблицы 4.1 сродство к электрону молекул йода составляет 3,2 эВ. Низковольтная проводимость растворов и скорость ЭГД-течений в системе провод над плоскостью оказались пропорциональны концентрации растворенного йода, диапазон изменения концентраций составил $10^{-5} - 10^{-3}$ г /см³. Таким образом, примеси, обладающие повышенным сродством к электрону – йод, бутиловый спирт, α - лейцин интенсифицировали ЭГД-течение. В то же время как видно из рис. 4.26, примеси йодного олова – типичной соли, обладающие повышенным значением коэффициента диссоциации вызывают значительно менее существенный рост скорости ЭГД-течений и низковольтной проводимости жидкости. Как будет показано далее эффект Вина проявляется в жидкостях с уровнем низковольтной проводимости порядка 10 нСм/м. В группе исследованных жидкостей низковольтная проводимость не превышает 1 нСм/м, при этом использование соли, обладающей высокими диссоционными свойствами не дает высокого вклада, как в процессы образования объемного заряда, так и в величину низковольтной проводимости исходной диэлектрической жидкости.

При введении в жидкость примесей о характере ионообразования можно судить лишь по вторичным признакам, таким, как например, электронно - акцепторные свойства растворяемого вещества. В то же время изменение значения проводимости при постоянном составе среды, только за счет целенаправленного изменения материала электрода, может стать прямым доказательством определяющей роли поверхностного ионообразования (инъекции) в процессах токопрохождения и интенсивности возникающих ЭГД-течений. Поэтому следующая серия экспериментов касалась исследования влияния материала электрода (катода) на кинематику ЭГД –течений и на ток через жидкость.

Влияние материала электродов на проводимость и скорость ЭГД-течений в изооктане [4.22, 4.23].

Описанная серия экспериментов по исследованию влияния материала электрода на интенсивность ЭГД-течений отличается тем, что в ней примесный состав исследуемой жидкости не изменялся, т.е. посторонние примеси в исходную жидкость не вводились. Поэтому роль инжекции в последней серии экспериментов исследована за счет изменения только материала электрода. Все эксперименты проведены в системе электродов провод (диаметром 0,5 – 0,1 мм) над плоскостью /медь/ в очищенном изооктане. Материал отрицательного электрода изменялся в порядке уменьшения работы выхода от платины к алюминию. Все остальные условия эксперимента сохранялись строго постоянными. Перед каждым экспериментом и после него проводился контроль значения низковольтной проводимости жидкости в ячейке с латунными плоскопараллельными электродами при напряжении питания 10 В. Эти измерения проводились с целью контроля изменения примесного состава исходной жидкости за счет возможного электрорастворения поверхностных веществ, присутствующих на электроде.

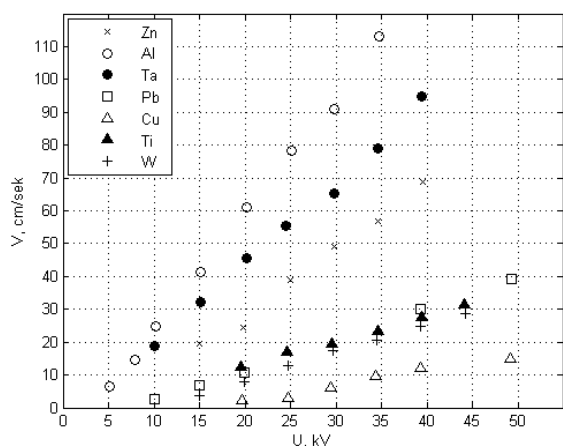


Рис. 4.27. Зависимости средней скорости в центральном струе ЭГД-течения от материала электрода.

Известно, что в обычных условиях поверхности многих металлов покрыты пленками труднорастворимых окислов, существенно изменяющих работу выхода с поверхности электрода. Поэтому перед экспериментом поверхности электродов тщательно очищались электрорастворением, либо очисткой наждачной бумагой непосредственно в жидкости без контакта с атмосферным воздухом.

На рис. 4.27 приведены зависимости средней скорости в центральной струе ЭГД-течения от поверхности цилиндрического отрицательного электрода. Различные обозначения соответствуют различным материалам электрода. Течение от платинового электрода было настолько слабым, что его не удалось зарегистрировать. Зависимости скорости от напряжения, снятые для каждого из металлов удовлетворительно аппроксимируются отрезками прямых, каждая из которых характеризуется постоянным значением предельного электрического числа Рейнольдса. Наблюдается тенденция роста значений относительной скорости ЭГД-течений по мере уменьшения работы выхода с металла в вакуум, в ряду от платины к алюминию. Аномально высокое значение в ряду исследованных материалов наблюдается лишь для течения от поверхности танталового электрода. Диапазон изменения электрического числа Рейнольдса в зависимости от материала катода весьма существеннее и составляет более порядка от платины до алюминия. Как было показано ранее, значение предельного электрического числа Рейнольдса характеризует среднюю плотность объемного заряда в центральной струе ЭГД-течения. Таким образом, только изменение материала катода при опорном медном аноде и прочих равных условиях приводит к изменению интенсивности инжекции, а, следовательно, и средней плотности

избыточного заряда в центральной струе ЭГД-течения более, чем на порядок. Этот результат является прямым доказательством определяющей роли инъекции, т.е. ионизации примесных молекул у поверхности катода.

Однако не следует считать, что интенсивность инъекции можно повышать неограниченно. Причины этого названы в предыдущем параграфе. Дело в том, что с повышением инъекции растет плотность инжектируемого заряда в жидкости, одноименного с электродом, что может снизить приэлектродную напряженность поля. Возникает эффект обратной связи при котором интенсивная инъекция обладает эффектом самогашения. В вакуумной технике этот эффект известен под названием ТОПЗ-токи ограниченные пространственным зарядом. Этот эффект ограничивает рост скорости ЭГД-течений с увеличением концентрации примесного состава. Как будет показано в следующей главе имеется еще один фактор – рекомбинационный эффект, который может привести к снижению плотности заряда, инжектируемого в «проводящую» жидкость. Поэтому зависимость интенсивности ЭГД-течений от концентрации примесей имеет экстремум.

Выводы.

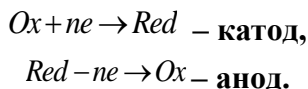
ЭГД-течения в неоднородном поле, образованном несимметричной системой электродов имеют зонную структуру: приэлектродные неподвижные слои, короткую зону ускорения, зону квази однородного течения и зону торможения.

1. ЭГД-течения имеет порог по напряжению возникновения, а также режимы неразвитого и развитого течения.
2. В хорошо очищенных от примесей диэлектрических жидкостях ЭГД-течения при использовании плохо инжектирующих электродов имеют высокое пороговое напряжение, иногда лежащее выше пробивного.
3. Возможно повышение интенсивности инъекции как путем использования электродов, изготовленных из металлов с пониженной работой выхода электрона, так и путем введения в диэлектрическую жидкость примесей, обладающих повышенными электронно-акцепторными свойствами: йод, бутанол, лейцин и др.
4. Нарушения линейного участка проводимости начинаются при более высоких напряжениях, чем порог возникновения ЭГД-течений.
5. Эксперименты с различного рода примесными добавками показали определяющую роль инъекции в формировании ЭГД-течений.
6. Интенсивность инъекции пропорциональна концентрации примесных добавок лишь в ограниченном интервале концентраций. При переходе в режим сильной инъекции появляется эффект самогашения инъекции с увеличением концентрации примесей. Это эффект связан с рекомбинационным поглощением инжектированного заряда, а также ослаблением внешнего поля полем инжектированного заряда. Этот эффект ограничивает интенсивность возникающих в жидкости ЭГД-течений инжекционного типа.
7. Наблюдается падение интенсивности ЭГД-течений в жидкостях с высоким уровнем низковольтной проводимости.

Особенности структуры ЭГД-течений при биполярной инжекции. [4.26 – 4.31].

В предыдущих разделах приведены результаты экспериментального исследования ЭГД-течений в закрытых объемах, в которых плоский противэлектрод непроницаем для жидкости. Далее изложены результаты экспериментального исследования ЭГД-течений в каналах, в которых электроды не препятствуют распространению жидкости в заэлектродную область. Поэтому в каналах влияние остаточного заряда существенно снижено. В каналах для исследования ЭГД-течений инжекционного типа целесообразно использовать т.н. симметричные системы электродов. Симметричной системой электродов будем называть систему состоящую из геометрически идентичных электродов типа шар-шар, (игла-игла, провод-провод), изготовленных из одинакового металла. В экспериментах электроды располагаются вдоль канала, причем один из электродов заземляется, а на другой подается высокое напряжение. Подобные системы характерны тем, что в отличие от несимметричных систем они не имеют асимметрии в структуре электрического поля у положительного и отрицательного электродов. Поэтому в симметричных системах условия для реализации инжекции одинаковы на обоих электродах, а ее интенсивность определяется исключительно свойствами примесей, обладающих либо электронно-акцепторными, либо электронно-донорными свойствами. Поэтому в такой системе по скорости течений от каждого электрода можно судить о наличии и об интенсивности инжекции с каждого электрода. Так, например, для реализации режима симметричных встречных ЭГД-течений необходимо реализовать равные условия зарядообразования на аноде и катоде.

Поскольку токопрохождение через жидкий диэлектрик обычно не сопровождается растворением электродов или выделением на них веществ, идентифицируем акт инжекции, как акт ионообразования, протекающий по окислительно-восстановительному механизму:



Акт ионизации в реальном растворе является сложным гетерогенным процессом, сопровождающимся целым рядом превращений. Если жидкий диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то его электрические свойства определяются примесными ионами, обладающими повышенными электронно-донорными либо электронно-акцепторными качествами. Поэтому считают, что перенос заряда на межфазной границе осуществляется преимущественно на примесные молекулы. Обозначим энергию ионизации восстановленной формы через E_{Red} , а энергию сродства к электрону окисленной формы через E_{Ox} . Уровень Ферми окислительно-восстановительной реакции определяется в виде:

$$F_0 = \frac{1}{2}[E_{Ox} + E_{Red}]; E_{Ox} - E_{Red} = 2E_p \quad (4.3)$$

где E_p – энергия, необходимая для реорганизации состояния растворителя при появлении в нем частицы окисленной или восстановленной формы. Для водных растворов величина этой энергии колеблется в окрестности 0,52 эВ. В соответствии с теорией кинетики приэлектродного обмена, плотность катодного и анодного токов соответственно равны:

$$j_a = ec_{red} k \exp \left\{ -\frac{[e(\varphi_M - \Delta\varphi) - E_{cp}]^2}{4kTE_p} \right\} \quad (4.4)$$

$$j_k = ec_{ox} k \exp \left\{ -\frac{[e(\varphi_M - \Delta\varphi) - E_u]^2}{4kTE_p} \right\} \quad (4.5)$$

где $e\varphi_M$ – уровень Ферми металла; E_u , E_{cp} – энергии ионизации и сродства к электрону примесной молекулы. Таким образом, в приэлектродной области у каждого электрода за счет инжекции образуется одноименно заряженный слой. Поэтому в условиях симметричной инжекции ЭГД-течения реализуются в виде двух встречных центральных струй рис.4.28(справа).

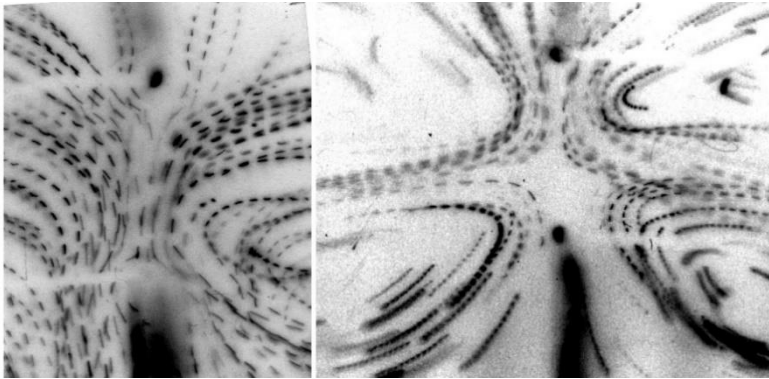


Рис.4.28. Сквозное (слева) и встречные (справа) ЭГД-течения

Как видно из формул, изменение условий инжекции на одном из электродов должно нарушить симметрию в картине ЭГД-течений. Эксперимент показывает, что изменение условий инжекции заряда на одном из электродов приводит к искажению симметричной структуры ЭГД-течений. Это изменение, как это видно из выражений (4.4) и (4.5), может про-

изойти при изменении напряжения на электродах, либо при изменении состава или концентрации примесной добавки, либо при изменении материала, либо покрытия одного из электродов. Как уже отмечалось при существенных нарушениях симметричности условий инжекции происходит переход от встречных течений к сквозному, представленный на фотографиях рис.4.28 (слева). Переход от встречных течений к сквозному происходит через ряд промежуточных стадий. При небольших нарушениях симметрии условий инжекции происходит искажение структуры встречных струй.

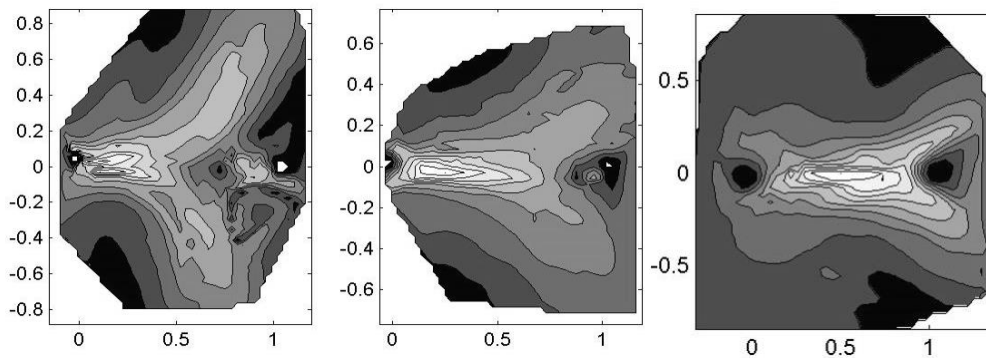


Рис.4.29. Контурные графики скорости центральных струй встречных и сквозного ЭГД-течений.

При небольшой разнице токов инжекции на электродах в середине межэлектродного промежутка, в месте встречи центральных струй встречных течений, суммарный заряд катодной и анодной струй является преимущественно отрицательным, и интегральная составляющая Кулоновских сил направлена к аноду. Поэтому боковые струи идут под неко-

торым углом к центральной оси. При дальнейшем увеличении концентрации бутанола скорость инжекции на катоде растет, и плотность заряда в катодной струе намного превышает анодную. Ускорение в прикатодной области намного выше, чем в прианодной, поэтому течение от анода не успевает развиваться. Встречный поток от анода сносится в заэлектродную область. Боковые струи выносятся за пределы межэлектродного промежутка. Сквозное течение можно представить, как предельный случай взаимодействия встречных струй, когда ЭГД-течение от одного из электродов не успевает развиваться, угол наклона боковых струй к первоначальному направлению течения уменьшается до очень малой величины, а боковые струи выходят далеко за пределы межэлектродного промежутка, огибая противозлектрод. В результате взаимодействия противоположно заряженных струй в заэлектродной области формируется вафлеобразная биполярно заряженная струя, в которой внутренняя часть заряжена положительно, а внешние струйки отрицательно. Поэтому за пределами межэлектродного промежутка, за анодом, где электрическое поле должно быть направлено в обратную к течению сторону появляется вторичная область ускорения. Казалось бы, что на течение в заэлектродной области со стороны электрического поля должны действовать тормозящие силы. Однако на самом деле здесь наблюдаются зоны ускорения. Течение в заэлектродной зоне шлейфа ламинарно, нет турбулентности, нет перемешивания струй. Противоположно заряженные струи в заэлектродной области движутся параллельно, не перемешиваясь. Противоионы, как и в боковых струях, могут сблизиться только за счет дрейфа (миграции) в собственном поперечном поле. Этот процесс медленный, так как скорость течения много больше скорости ионного дрейфа. Для рекомбинации им нужно сблизиться на расстояние, равное радиусу Дебая. Струя из-за внутреннего взаимодействия противоположно заряженных слоев, не может завернуть, пока не закончится рекомбинация. Поэтому заэлектродный шлейф длинный, порядка нескольких длин межэлектродного промежутка.

На рис.4.30 представлены карты линий уровня скорости и сил встречных ЭГД-течений в симметричной системе электродов провод-провод с различным уровнем асимметрии, небольшой слева и более существенной справа. Электроды расположены на уровне $(0,0)$ - катод и $(0,1)$ - анод. Боковые струи встречных течений распространяются перпендикулярно к центральному струям. Несимметричное ЭГД-течение направлено преимущественно от катода к аноду. Встречные центральные струи имеют различную степень асимметрии, течение от катода чуть более интенсивно, чем от анода, поэтому боковые струи идут под углом к центральной струе.

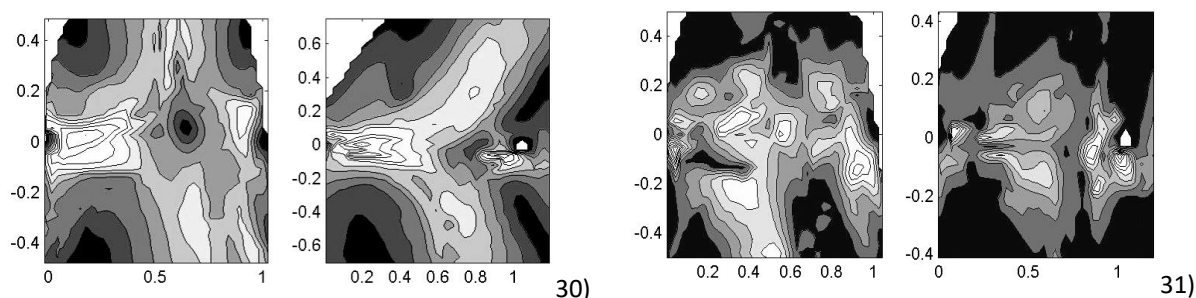


Рис.4.30 -31. Карты линий уровня скорости (30) и сил (31) встречных ЭГД-течений с различным уровнем асимметрии, малой (слева) и более существенной (справа).

На рис.4.32 приведено сопоставление центральных струй встречных и сквозного ЭГД-течения системе электродов провод–провод. Электроды расположены на уровне (0,0) – катод и (0,1) –анод. Сквозное ЭГД-течение направлено от катода к аноду,

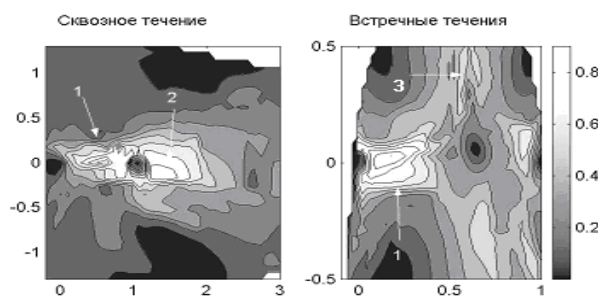


Рис.4.32. Карты линий уровня скорости центральных струй сквозного (слева) и встречных (справа) ЭГД-течений.

Переход от режима несимметричных встречных ЭГД-течений к сквозному приведен на картах линий уровня скорости. Стрелками на графиках течений обозначены: 1 - струя от катода, 2 - струя от анода, 3 - боковая струя. На поверхностных графиках скорости (рис.4.33) эти участки приведены в виде трехмерного графика распределения модуля скорости. Центральные струи встречных течений на 3-D графике видны в виде хребтов: первый идет от катода в середину межэлектродного промежутка, где раздваивается на два, расходящихся под косым углом к центральной оси течения (стрелки, рис.4.33), второй имеет пик вблизи анода.

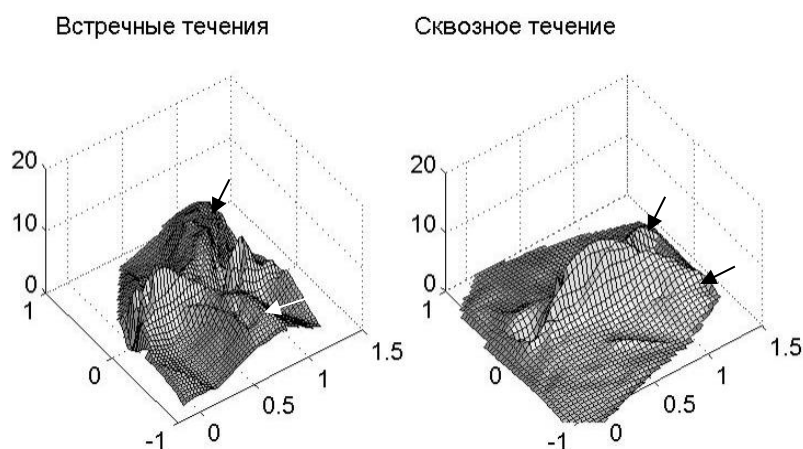


Рис.4.33. Поверхностные 3-D графики скорости центральных струй встречных и сквозного течений.

Между хребтом и пиком имеется ложбинка, расположенная на уровне, соответствующем месту встречи противоположно направленных струй ЭГД-течений. На картах линий уровня скорости эти хребты видны в виде светлых областей, соответствующих повышенному уровню скорости, а ложбинка в виде темной области, несколько смещенной от середины межэлектродного промежутка к аноду. Видно, что наибольшее ускорение жидкость испытывает в струе, текущей от катода, однако небольшие области ускорения имеются также и в боковых струях. Распределение модуля скорости сквозного ЭГД-течения более плавное и имеет один хребет, соответствующий основной центральной струе.

На рис.4.34 представлены более крупным планом карта линий уровня скорости и поверхностный график скорости сквозного ЭГД-течения – общий план. На картах линий уровня скорости сквозного течения основная центральная струя, текущая от катода, обозначена стрелкой 1, а за электродная структура стрелкой 2. По осям отложено относительное расстояние в длинах межэлектродного промежутка. Электроды расположены на уровнях: катод – (0,0), анод – (0,1). Приэлектродные области видны на картах линий уровня скорости в виде темных пятен на уровне (0,0) и (0,1). На поверхностном 3D графике скорости приэлектродная область у анода видна в виде ложбинки на уровне (0,1). Основная центральная струя имеет протяженную зону ускорения, занимающую большую часть межэлектродного промежутка, показанную на 3- графике стрелкой. Область торможения у противозэлектрода практически отсутствует, т.к. линии тока обтекают противозлектрод.

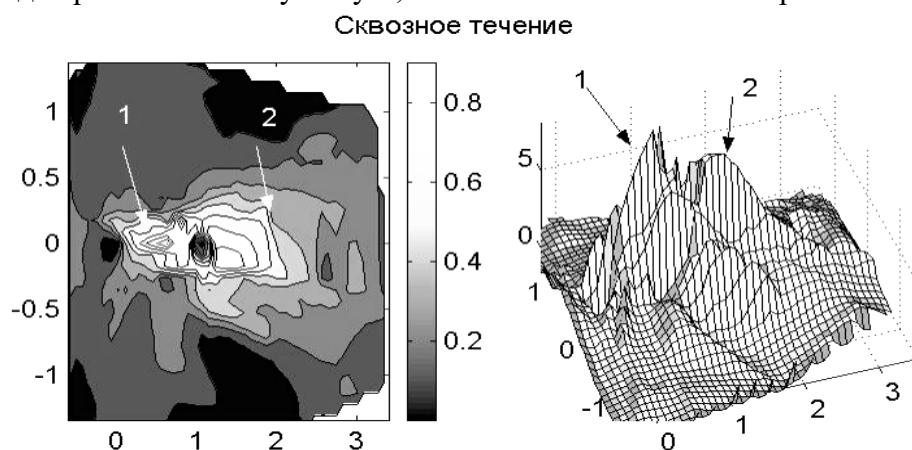


Рис. 4.34. Карта линий уровня скорости (слева) и поверхностный график скорости (справа) центральной струи сквозного ЭГД-течения.

Видно, что за положительным электродом скорость течения незначительно возрастает, а интенсивный спад скорости начинается на уровне, помеченном стрелкой 2, скорость спадает до уровня 0.4 от максимального значения на расстоянии 3, т.е. на расстоянии в два межэлектродных промежутка за анодом. В заэлектродной области, на уровне 1,2÷1,5, имеется небольшая вторичная зона ускорения. Таким образом, зонная структура центральной струи сквозного ЭГД-течения существенно отличается от несимметричных и встречных течений: центральная струя выходит за пределы межэлектродного промежутка, обтекая анод, зона рекомбинации и зона торможения вынесены далеко за пределы межэлектродного промежутка в заэлектродную область, где поле электродов в электростатическом приближении направлено противоположно направлению течения жидкости. Как видно (рис.4.34), зона ускорения сквозного ЭГД-течения растянута более чем на половину межэлектродного промежутка. Такая структура сквозного ЭГД-течения обусловлена повышенной рекомбинацией в области взаимодействия основной и вторичной центральных струй в заэлектродной области, препятствуя накоплению избыточного заряда, формирующего т.н. зарядовую пробку. Этот процесс будет описан в шестой главе.

Эти удивительные свойства сквозного ЭГД-течения делают его особенно привлекательным для использования в различных ЭГД-устройствах, так как в нем реализованы оптимальные условия для преобразования электрической энергии в энергию гидродинамическую. Этот важный вывод имеет большое прикладное значение, так как открывает новое направления в конструировании ЭГД-устройств. Отличительной особенностью этого направления является рациональный подбор свойств границы раздела электрод-

жидкость и учет особенностей зонной структуры ЭГД-течений при конструировании ЭГД-устройств. Поэтому свойства сквозного ЭГД-течения исследованы наиболее детально.

Элементарный акт инжекции, т.е. акт ионизации на поверхности отрицательного электрода в реальном растворе является сложным гетерогенным процессом, сопровождающимся целым рядом превращений. Если жидкий диэлектрик характеризуется как хороший изоляционный материал, то его электрические свойства определяются примесными ионами, обладающими повышенными электронно-акцепторными качествами. Поэтому перенос заряда на границе электрод–жидкость осуществляется преимущественно на примесные молекулы. В качестве примесей, как и ранее использовались примеси, обладающие повышенными электронно-акцепторными свойствами, бутанол и йод. В первой серии экспериментов электроды были выполнены из медных проводов одинакового диаметра 0,3 мм. Исследовалось влияние примесей, обладающих электронно-акцепторными свойствами, на структуру и скорость ЭГД-течений в канале. В различных экспериментах при помощи увеличения концентрации электронно-акцепторной примеси предполагалось увеличивать плотность тока инжекции с отрицательного электрода, а следовательно плавно изменять интенсивность центральной струи с катода и осуществит переход от режима встречных ЭГД-течений к сквозному.

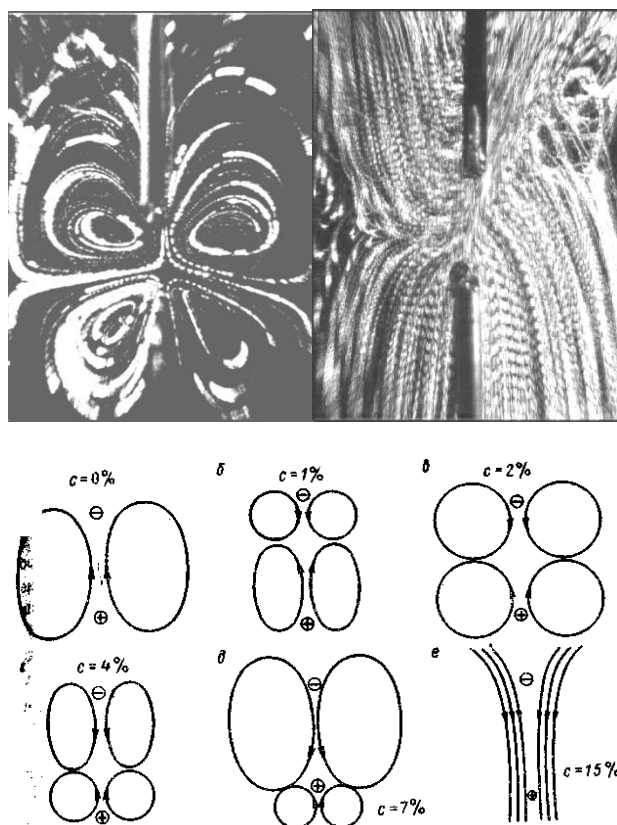


Рис. 4.35. Структура ЭГД-течений в растворах бутанола в трансформаторном масле различных концентраций.

Что касается хорошо очищенного трансформаторного масла, то в ней наиболее вероятным является ионообразование в результате электрорастворения металла электрода. Как уже отмечалось, в главе 3 эта реакция идет на аноде с образованием у поверхности электрода положительных ионов. Поэтому в жидкостях с высокой степенью очистки следует ожи-

дать возникновения ЭГД-течения от анода. Для проверки этих соображений была проведена серия наблюдений с использованием пузырьковой визуализации ЭГД-течений. (рис.4.35, а). Действительно в хорошо очищенной жидкости наблюдалось слабоинтенсивное течение с положительного электрода (рис. 4.45а). При одинаковых условиях ионообразования на поверхности анода и катода ЭГД-течение в системе двух взаимно параллельных проводов должно реализоваться в виде встречных потоков с одинаковой интенсивностью. Вводя в исходную жидкость примеси, обладающие повышенным сродством к электрону (спирты, галогены), можно стимулировать ионообразование у поверхности катода и, следовательно, интенсифицировать течение от него на фоне встречного течения от анода. Итак, путем изменения контактных свойств границ электрод–жидкость в симметричных системах электродов, можно изменять структуру ЭГД-потоков, возникающих в результате определяющей роли инъекции.

При введении примеси бутилового спирта, содержащей группу -ОН, возникает инъекция на катоде по схеме $M + e \rightarrow M^-$ где М-молекула бутанола. При малых концентрациях с бутилового спирта интенсивности ионообразования у анода и катода сравниваются, это приводит к переходу от режима сквозного течения от анода к режиму встречных течений от обоих электродов (рис.4.35, б, в). Картина течений нестабильна во времени, наблюдается спонтанное изменение направления течений при постоянном приложенном напряжении.

При плавном увеличении концентрации примесных молекул бутилового спирта до 10 % происходит постепенная интенсификация ЭГД-течений от катода в связи с увеличением интенсивности инъекции отрицательных ионов, это видно по нарушению симметричной структуры течений, которая проходя ряд последовательных стадий, переходит в картину, показанную на рис.4.35, г, д. Эта стадия характеризуется существенно более интенсивной инъекцией с катода, что хорошо заметно по структуре возникающего течения. Видно, что течение от катода более интенсивное, поэтому струя, исходящая от него, захватывает за середину межэлектродного промежутка. Этот процесс продолжается вплоть до концентраций бутилового спирта 10÷15 %, когда течение от катода становится подавляющим и переходит в сквозное (рис.4.35, е). В этом режиме вихри у положительного электрода исчезают, наблюдается лишь некоторая неподвижная область у поверхности положительного электрода, размер которой не превышает 1 мм.

При растворении в чистом трансформаторном масле йода, обладающего повышенным сродством к электрону (3,2 эВ), наблюдается аналогичный эффект, но при значительно меньших концентрациях примеси. При малых концентрациях йода ($10^{-5} \div 10^{-6}$ г/см³) в жидкости наблюдаются встречные ЭГД-течения от обоих электродов типа представленных на рис.4.35, б, в. Увеличение концентрации йода приводит к росту интенсивности ЭГД-течения от катода, и при $c = 10^{-4} \div 10^{-3}$ г/см³, проводимость растворов составляет величину порядка $10^{-10}(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ и наблюдается сквозное течение от катода. Интенсивность сквозного течения в растворах йода ниже, чем в растворах бутилового спирта. Из-за оптической непрозрачности растворов йода исследовать структуру ЭГД-течений в растворах йода высоких концентраций не удалось. Сквозное течение от катода наблюдается также в трансформаторном масле повышенной влажности, содержащем, как и растворы спиртов, гидроксильную группу -ОН.

Как показал анализ кинематики сквозного ЭГД-течения показывает, что оно имеет четко очерченную область центральной струи – область приложения кулоновских сил. Протяженность ее не превышает длины межэлектродного промежутка, а ширина определяется размерами приэлектродной заряженной зоны и в нашем случае составляет $2 \div 3$ мм. В начале центральной струи, у активного электрода, линии тока жидкости сужаются, образуя воронкообразную полость у катода. Далее по промежутку они взаимно параллельны, а за анодом вновь расходятся, образуя в заэлектродной области длинный хвост. В свободном канале направление сквозного течения испытывает случайные временные флуктуации. Распределение объемного заряда в хвосте сквозного течения двухслойно, т.к. инжектируют оба электрода: центральная область заряжена одноименно с пассивным электродом, периферические области хвоста - зарядом противоположного знака. Заряд с пассивного электрода стекает в заэлектродное пространство, и, следовательно, зона рекомбинации смещена по ходу течения в заэлектродную область.

Однако, как уже отмечалось ранее, интенсивность инъекции можно увеличивать не беспредельно. При переходе в режим сильной инъекции включается механизм обратной связи – саморегуляции, когда инжектируемый объемный заряд снижает напряженность поля в приэлектродной области и тем самым ограничивает интенсивность инъекции. Наряду с этим с увеличением низковольтной проводимости жидкости проникновение объемного заряда в объем жидкости ограничивается рекомбинационными процессами (см. главу 3). Далее в главе 6 эти процессы будут рассмотрены подробно. Поэтому дальнейшее увеличение концентрации бутилового спирта больше 20 % приводит к дальнейшему изменению структуры потоков. При проводимости $10^{-8} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ вновь появляется слабое встречное течение от анода, и ЭГД-течение вновь приобретает четырех ячеистую структуру. При этом течение от отрицательного электрода выражено сильнее, ячейки этого течения занимают большую часть межэлектродного промежутка. Протокотечение от положительного электрода менее интенсивно, ячейки смещены за нижний электрод. При этом существенно ослабляется сквозной поток жидкости. Область, занимаемая течением, сужается. Дальнейшее повышение концентрации бутилового спирта до 30 – 40 %, приводящее к увеличению низковольтной проводимости до уровня в $10^{-7} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ приводит к симметризации встречных потоков от отрицательного и положительного электродов и сквозное течение в канале исчезает вообще. Горизонтальная плоскость раздела течений от верхнего и нижнего электродов смещается к середине межэлектродного промежутка (рис. 4.35). Однако при этом скорость течений падает.

Встречные течения, возникающие при малых концентрациях электронно-акцепторной примеси похожи на течение в несимметричной системе типа провод над плоскостью, в области центральной струи они имеют типовые имеют характерные особенности, линии тока взаимно параллельны и прямолинейны. После встречи в середине межэлектродного промежутка центральные струи встречных потоков разделяются, образуя две поперечные, расходящиеся боковые струи. Линии тока этих струй параллельны воображаемой плоскости, проходящей через центр межэлектродного промежутка, нормальной к направлению центральной струи течения. Течение в области центральных струй устойчиво и ламинарно, мелкомасштабных завихрений не наблюдается.

В случае встречного четырех ячеистого ЭГД-течения, центральные струи, отходящие от поверхности каждого из электродов и движущиеся навстречу, заряжены противо-

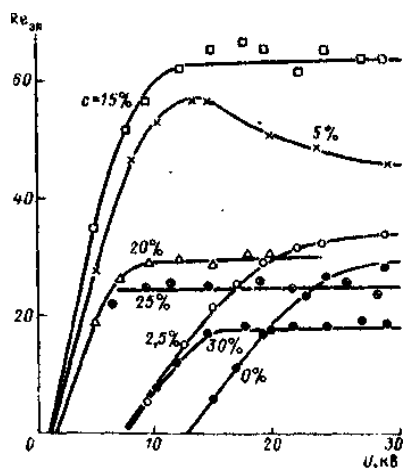


Рис.4.36. Зависимости электрического числа Рейнольдса от напряжения в растворах бутанола в трансформаторном масле с примесью бутанола различных концентраций.

положно друг другу. Заряд центральной части каждой из струй соответствует заряду того электрода, от поверхности которого эта течёт струя. После встречи, в середине межэлектродного промежутка при ламинарном течении противоположно заряженные области жидкости текут взаимно параллельным курсом вдоль плоскости, разделяющей потоки от верхнего и нижнего электродов. Поскольку в режиме ламинарного течения перемешивание отсутствует, то в стационарном режиме ($i = \text{const}$) при $Re_{el} \gg 1$ интенсивная конвективная доставка заряда в зону встречи струй должна быть скомпенсирована поперечной миграцией в наведенном поле с последующей их рекомбинацией вдоль плоскости, разделяющей встречные струи. При течении в несимметричной системе провод-плоскость подобные процессы также возможны. Однако рекомбинация проходит вдоль плоского противозэлектрода, который одновременно инжектирует противозаряд. Поэтому выделить область рекомбинации в этом случае невозможно. По-видимому, из-за большой площади смоченной поверхности заряд, одноименный заряду плоского электрода, получают возвратные потоки жидкости и область рекомбинации смещена в возвратные струи.

Как было отмечено, во встречных течениях область рекомбинации противоионов проходит вдоль всей поверхности разделения противоположно заряженных струй потока, в том числе и в центральной струе течения. Указанные различия зарядовой структуры встречных ЭГД-течений формируют их индивидуальную кинематическую структуру. Так, например, из-за сильного взаимодействия встречных противоположно заряженных ЭГД-потоков течение в области горизонтальных расходящихся струй носит квазиодномерный характер, струи заметно вытянуты в горизонтальном направлении.

Какова же причина возникновения встречных ЭГД-течений при больших концентрациях электронно-акцепторной примеси (бутанола). Однако одной из возможных причин является увеличенная миграционная составляющая тока. Жидкость, содержащая 20 % и более бутанола, обладает повышенной низковольтной проводимостью: более чем $10^{-8} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. Время релаксации заряда ($\tau = \epsilon/\sigma$) в этих жидкостях не превышает 0,001 с, а безразмерный параметр $\Gamma = l_0/(\nu \cdot \tau) < 10$ при скоростях 1 м/с и $l_0 = 1$ см. Это значит, что электрический заряд центральной струи успевает мигрировать в объем жидкости, не доходя до поверхности противозэлектрода, т.е. мы имеем дело с режимом неразвитого ЭГД-течения. В таком режиме объемный заряд, образующийся у поверхности стартового электрода, не может дойти до противозэлектрода и образовать биполярную структуру, а, следовательно, и сквозное течение. Поэтому при этом уровне проводимости сквозное течение не реализуется.

На рис.4.36 представлены зависимости электрического числа Рейнольдса от напряжения в растворах бутанола в трансформаторном масле различной концентрации. Они, также, как и в несимметричной системе электродов, имеют типовой вид: начальный быстрый рост средней относительной скорости течений сменяется участком насыщения. Как

видно из рис. 4.36 пороговые напряжения также зависят от концентрации примеси: они имеют повышенные значения у жидкостей с высокой и низкой проводимостью, а у жидкостей с содержанием бутанола 5÷15 % пороговые значения минимальны. В то же время предельные значения электрического числа Рейнольдса, как и в несимметричной системе электродов, возрастают в диапазоне концентраций 0-15%, а затем несколько спадают при увеличении концентрации выше 20%, т.е. имеют слабо выраженный максимум при тех же значениях концентрации бутанола. Снижение интенсивности течений и переход из режима сквозного в режим встречных течений при повышенных концентрациях примеси, по видимому, связан с повышенной гибелью инжектируемых ионов в пределах ионизационно-рекомбинационных слоев, которые препятствуют проникновению инжектируемого заряда в объем жидкости в жидкостях повышенной проводимости. Уровень проводимости, при котором этот эффект ощутим порядка 10 нСм/м. В этих условиях единственным механизмом образования объемного заряда является эффект Вина, не зависящий от полярности электрода. Этим можно объяснить режим встречных ЭГД-течений в жидкостях повышенной проводимости.

Исследование ЭГД-течений в симметричной системе электродов PIV-методом [4.30, 4.31].

В этом параграфе приведены результаты экспериментальных исследований ЭГД-течений на современной установке. Кювета и система электродов, в которой производились измерения, представлена на рис. 4.37, размеры: радиус электродов 250 мкм, расстояние между электродами 1 см. На нижний электрод подается высокое напряжение отрицательной полярности, верхний электрод соединен с землей через сопротивление 100 кОм, по падению напряжения на этом сопротивлении определяется величина ток, протекающего в системе.

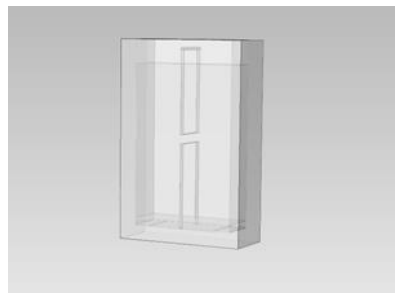


Рис. 4.37. Кювета и система электродов в которой проводились эксперименты.

Измерения поля скоростей производились с помощью PIV-метода на установке Flow Master от компании LaVision. В состав установки входит двух импульсный Nd-YAG лазер с линией возбуждения в видимом диапазоне 532 нм, временем вспышки 4 нс, энергия вспышки была выбрана равной приблизительно 50 мДж. На выход лазера была установлена цилиндрическая линза, которая преобразовывала пучок света в подобие оптического ножа для визуализации течения в центре кюветы (луч попадает в кювету слева). Ширина получаемого оптического ножа оценивалась примерно в 0.5-1 мм. Полученное изображение фиксировалось с помощью камеры с разрешающей способностью по интенсивности равной 14 бит и размером матрицы 1200x1600 и потом обрабатывались в программе DaVis. Время между вспышками лазера выбиралось таким образом, чтобы смещение визуализирующих частиц была больше одного пикселя и меньше четверти размера поискового окна. Обработка данных производилось с помощью адаптивного алгоритма за несколько итераций. Размер окна на первой итерации выбирался равным 48x48 пикселей, перекрытие 50%, на втором проходе размер окна был равен 24x24 пикселя, перекрытие 50%. После этого к полученным данным применялся фильтр, который отсеивал значения скорости, если функция кросс-корреляции была меньше 0.3. Полученные данные по каж-

дому измерению в серии усреднялись. Отдельные измерения использовались для оценки погрешности измерений.

Для визуализации использовались полые стеклянные шарики из боросиликатного стекла, концентрация которых была порядка 0.1 г/л. В качестве рабочей жидкости был выбран ПДМС-5, то есть кинематическая вязкость данной жидкости равна 5 сСт, плотность 950 кг/м^3 , диэлектрическая проницаемость 2.4, проводимость чистой жидкости $1.5 \cdot 10^{-13} \text{ См/м}$. Для увеличения концентрации электронно-акцепторной примеси (проводимости) в рабочую жидкость добавлялось фиксированное количество бутилового спирта в диапазоне концентраций от 1% до 17% с шагом 2%. Для каждой концентрации измерялось значение низковольтной проводимости. График зависимости проводимости смеси от концентрации бутанола представлен на рис. 4.67. Эта зависимость качественно соответствует аналогичной зависимости для трансформаторного масла, использованного ранее.

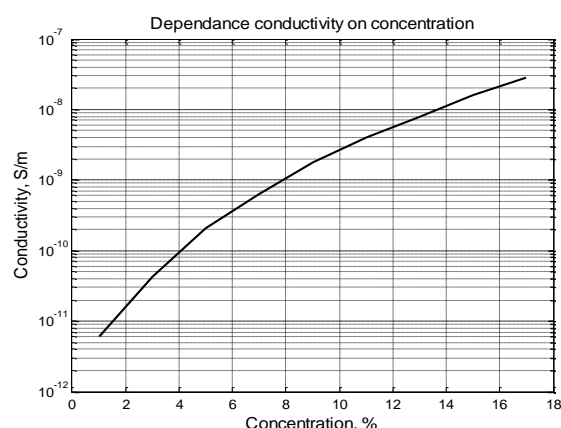


Рис. 4.38. Зависимость проводимости от концентрации бутанола.

Из рис. 4.38 видно, что зависимость низковольтной проводимости от концентрации бутанола нелинейная, даже небольшая добавка примеси в исходную жидкость приводит к значительным изменениям проводимости. Зависимость в целом соответствует аналогичной зависимости в трансформаторном масле. С увеличением концентрации примеси выше 5-10% этот процесс замедляется.

Сравним приведенные вольтамперные характеристики для разных значений концентрации бутанола. Поскольку как было показано выше значения проводимости для разных растворов могут значительно отличаться, то целесообразно строить ВАХ в приведенном виде, то есть значения размерного тока, поделенные на $\sigma_0 E$. В этом масштабе (см. рис.4.39) вольтамперные характеристики имеют типовой вид и содержат два участка: низковольтный – закон Ома и высоковольтный –

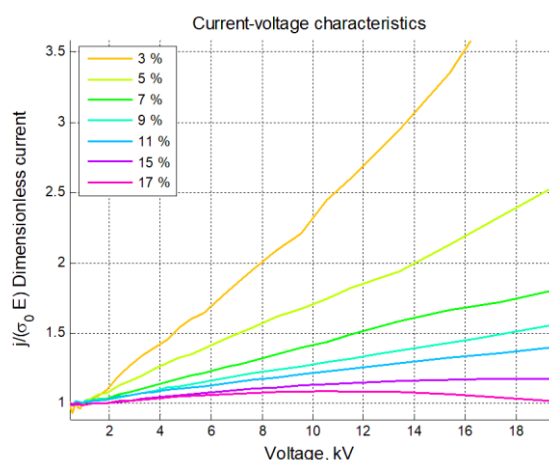


Рис. 4.39. Приведенные ВАХ для разных концентраций бутанола.

Значения тока на этом графике начинаются с единицы, так как на начальном линейном участке ток обуславливается наличием низковольтной проводимости. После чего мы видим, что для малых концентраций бутанола имеется значительное отклонение от единицы и зависимость приведенного безразмерного тока приобретает линейный характер, то есть реальный ток в системе на высоковольтном участке может быть аппроксимирован параболической кривой. Максимальное отклонение от закона Ома достигается при концентрации бутанола 1% (на графике для удобства отоб-

ражения этого графика нет) и оно равняется 7. С увеличением концентрации отклонение от линейного участка уменьшается. Аналогичные ВАХ были получены в исследованиях ЭГД-течений в трансформаторном масле с примесями бутанола для несимметричной системы электродов.

Рассмотрим далее типичные распределения скорости ЭГД-течений, получаемые в эксперименте. Здесь стоит отметить, что в чистой жидкости значение времени Максвелловской релаксации составляет примерно 100 секунд. Из-за этого даже небольшие флуктуации тока приводят к накоплению объемного заряда в жидкости, влияющему на локальное поле, что в свою очередь приводит к существенной временной нестабильности течений. Исследование нестабильных течений затруднительно. Поэтому далее приводятся распределения скорости, начиная с концентрации бутанола в 3%, когда течения стабилизируются.

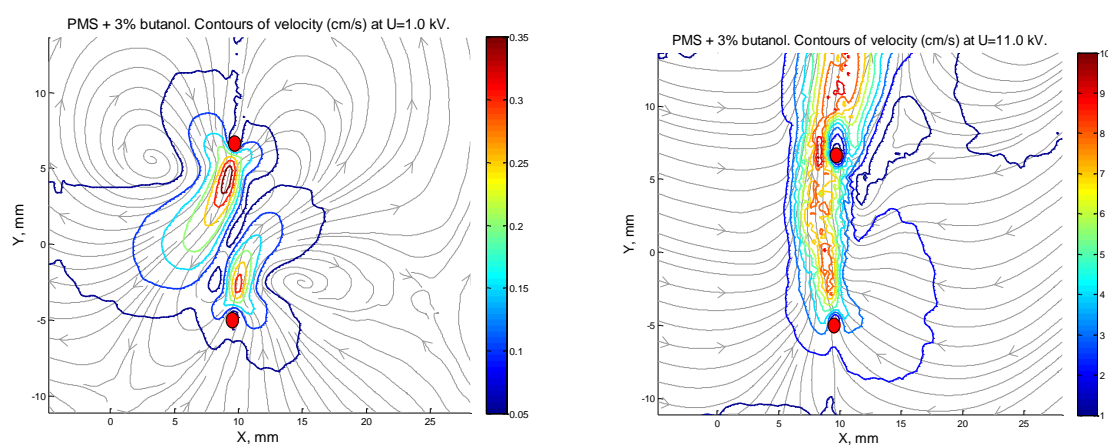


Рис. 4.40 Распределения скорости при небольших значениях концентрации бутанола. Верхний график – неразвитое течения, режим встречных течений (1 кВ), нижний – развитое сквозное ЭГД - течение (11 кВ), проводимость - 2 нСм.

На графиках (рис. 4.40) представлено распределение поля скоростей в режиме неразвитого и развитого ЭГД-течений. Видим, что при небольших значениях напряжения порядка 1-2 кВ наблюдается режим слабых встречных течений, имеющих двух ячеистую структуру. При увеличении напряжения формируется направленное сквозное течение от анода, а также можно видеть, что за пассивным электродом появляется дополнительная зона ускорения и течение в целом приобретает сквозной характер без внутренних завихрений, аналогичный описанному для трансформаторного масла.

Такой вид течений сохраняется в жидкостях, содержащих 3-7% бутанола и имеющих низковольтную проводимость от 0,01 до 1 нСм/м. В жидкости содержащей 9% бутанола с проводимостью 2 нСм/м направление сквозного течения изменяется на обратное. Это значит, что ток инъекции с отрицательного электрода стал выше, чем ток инъекции с положительного, что привело к изменению направления течения. Из графика на рис. 4.41 видно, что при малых напряжениях вблизи порога возникновения ЭГД течения вновь возникают четырех ячеистые структуры в которых максимумы скорости также локализованы вблизи электродов. Основное отличие появляется при больших напряжениях, где внутренние вихри пропадают, а возникает сложная структура сквозного течения от отрицательного электрода. При этом изменяется направление сквозного течения и центральная струйка, формирующаяся у отрицательного электрода у пассивного положительного элект-

трода раздваивается под острым углом к оси симметрии с образованием двух косых струй в заэлектродной области.

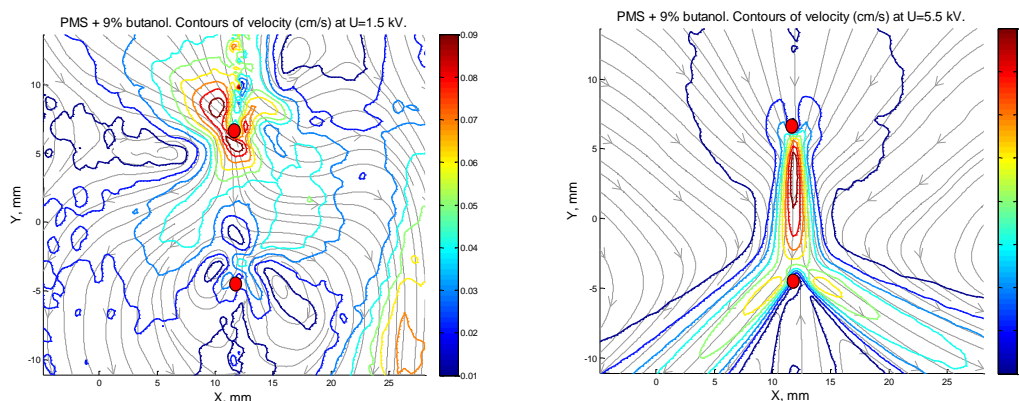


Рис. 4.41. Неразвитой (слева) и развитой (справа) режимы течения при концентрации бутанола 9%.

При дальнейшем повышении концентрации бутанола до 15 % (соответствующая низковольтная проводимость достигает уровня 10 нСм/м) в межэлектродном промежутке появляются встречные струи равной интенсивности, образующие замкнутые четырех ячеистые вихри. (рис. 4.42). В режиме неразвитого течения вихри локализованы в основном у каждого из электродов, основное ускорение наблюдается вдоль боковых поверхностей электродов. Внутри межэлектродного промежутка боковые струи значительно шире по сравнению с предыдущим случаем. При больших напряжениях течение вновь приобретает симметричную форму, то есть области ускорения сместились под каждый из электродов и ускорение встречных струй происходит вдоль оси навстречу друг другу, сквозное течение практически отсутствует.

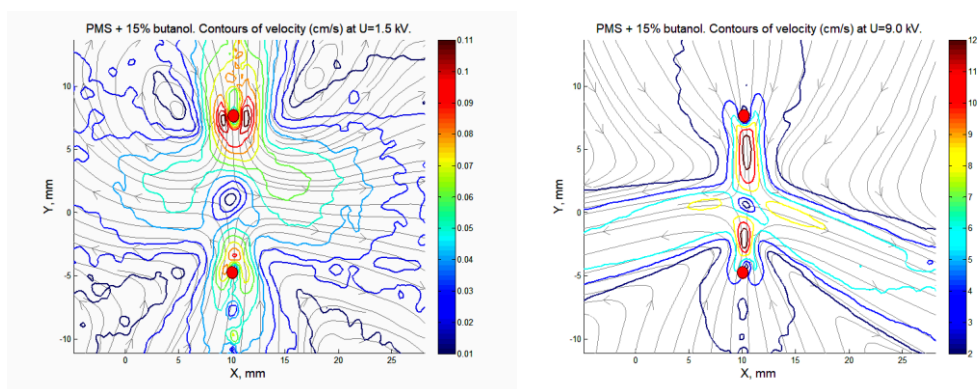


Рис. 4.42. Неразвитый и развитый режимы ЭГД-течений при значениях концентрации равной 15%.

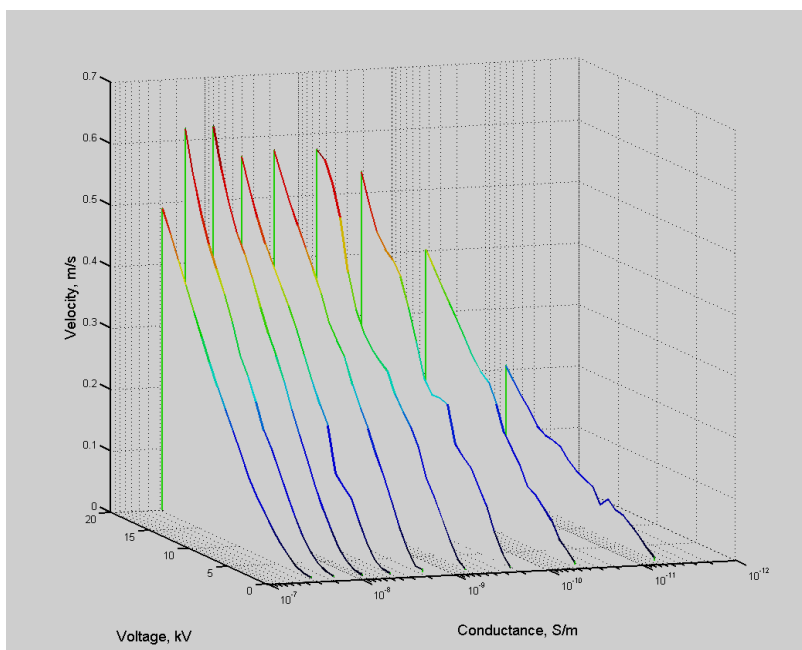


Рис. 4.43. Зависимость максимальной скорости от проводимости и напряжения.

При дальнейшем увеличении концентрации бутанола течение сохраняет встречно-симметричный характер вплоть до концентрации в 17% и проводимостей 5 нСм/м. При этом скорость встречных течений несколько падает. Напомним, что в растворах бутанола в трансформаторном масле эффект встречных течений реализуется в диапазоне более высоких концентраций 20-30%. На рисунке 4.43 приведен объединенный трехмерный график зависимостей максимальной скорости ЭГД-течений от напряжения для жидкостей с различной концентрацией примеси бутанола, а, следовательно, низковольтной проводимости.

Напряжение увеличивается вдоль оси u , низковольтная проводимость увеличивается справа налево по оси x . Мы видим, что для каждой проводимости имеются линейные участки зависимостей средней скорости от напряжения, причем эта зависимость имеет различный угол наклона к оси u для каждой проводимости. Это значит, что электрическое число Рейнольдса для каждой жидкости постоянно. Аналогичные зависимости характерны для течений в несимметричных системах электродов типа провод над плоскостью (см. рис. 4.36). В области относительно малой проводимости 0,01-0,1 нСм/м (концентрации примесей 3-6%) угол наклона меньше, по мере увеличения концентрации примесей угол наклона растет вплоть до концентрации 9%. Далее до концентрации 15% угол наклона не меняется, а при концентрации 17% угол наклона вновь падает. При этом можно заметить, что напряжение возникновения ЭГД-течений с ростом проводимости повышается с примерно 0,4 кВ для концентрации 1% до 1,5 кВ для концентрации 17%. Если проследить зависимость средней скорости от проводимости при фиксированном напряжении, то зависимость имеет рост в диапазоне 3-9%, а затем спад в диапазоне 15-17%. В начале с ростом проводимости мы видим, что имеется также рост значения максимальной скорости до значений проводимости 1 нСм/м, затем наблюдается область плато до концентрации равной 15%, что соответствует проводимости $2 \cdot 10^{-8}$ См/м. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к понижению скорости ЭГД-течений.

Таким образом полученные результаты в целом соответствуют приведенным выше для трансформаторного масла с примесью бутанола. При малых значениях концентрации

бутанола (до 9%) в полиметилсилоксане при использовании симметричной системы электродов провод-провод реализуется режим сквозного ЭГД-течения от анода, т.к. плотность тока инъекции с положительного электрода выше, чем с отрицательного. В трансформаторном масле этот режим наблюдается при отсутствии бутанола. Затем при повышении концентрации электронно-акцепторной примеси до 9% в симметричной системе наблюдается смена направления течения на обратное от катода, а режим сквозного течения сохраняется. При этой концентрации ток с отрицательного электрода выше, чем с положительного. Низковольтная проводимость этой жидкости порядка 0,1 нСм/м. В этом диапазоне проводимостей течения носят инъекционный характер. В трансформаторном масле этот режим реализуется при концентрации бутанола 10-15%. При дальнейшем увеличении концентрации выше 10% вновь осуществляется переход к режиму встречных течений. По-видимому, этот переход обусловлен изменением механизма инъекции. При столь высоких уровнях проводимости инжектируемые с электродов ионы рекомбинируют с ионами проводимости в пределах приэлектродных рекомбинационных слоев и не попадают в объем жидкости. В этих условиях течения могут быть вызваны эффектом Вина. Этот механизм не зависит от полярности электродов, а определяется приэлектродной напряженностью поля, которая одинакова у обоих электродов. Поэтому возникающие течения встречно симметричны. Многообразие форм течений в смесях ПМС с бутанолом в целом соответствует ранее описанному для трансформаторного масла.

Как и для трансформаторного масла при фиксированном напряжении зависимость средней скорости в центральной струе ЭГД-течения от концентрации примесей имеет слабовыраженный экстремум, соответствующий концентрации бутанола в 9-15%, а проводимости 1-100 нСм/м.

Выводы.

1. Результаты систематического экспериментального исследования ЭГД-течений в симметричной системе электродов типа провод-провод в трансформаторном масле и ПМС с примесью бутанола показали, что механизму биполярной инъекции сопутствует существенное изменение структуры ЭГД-течений с изменением концентрации примеси, что позволяет наиболее отчетливо исследовать особенности этого механизма.
2. Анализ результатов исследований позволил выявить и описать две основных формы ЭГД-течений инъекционного типа: встречные и сквозное ЭГД-течение.
3. Также, как и в несимметричной системе электродов, ЭГД-течения в симметричной системе имеют типовую зонную структуру, а также порог возникновения.
4. В режиме встречных и сквозного ЭГД-течения выявлена и детально описана зона рекомбинации.
5. Приведен детальный анализ кинематической структуры сквозного ЭГД-течения, показавший, что зона рекомбинации смещена в заэлектродную область.
6. Исследование структуры ЭГД-течений в системе провод-провод выполненное в ПМС с примесью бутанола при помощи PIV метода на лазерной установке подтвердили полученные ранее результаты о структуре течений, возникающих в условиях биполярной инъекции.

Исследование ЭГД-течений, обусловленных эффектом Вина [4.32, 4.33].

В жидких диэлектриках реализуются два основных механизма высоковольтного зарядообразования – это инъекция и диссоциация, усиленная электрическим полем (или т.н.

эффект Вина). Если первый из этих механизмов является наиболее изученным, то учёт второго является, скорее, исключением и встречается лишь в единичных работах. Главная проблема разделения этих двух механизмов зарядообразования состоит в том, что они оба локализованы в области максимальной напряжённости электрического поля, т.е., как правило, у поверхности заострённых электродов. Кроме того, согласно численному моделированию, изложенному в следующей главе, структура ЭГД-течений для системы электродов игла-плоскость под действием и добавочной диссоциации в сильном поле и инжекции оказывается весьма схожей, что сильно затрудняет идентификацию преобладающего механизма зарядообразования по результатам исследования поля скоростей возникающих течений. Исследование ЭГД-течений в симметричных системах электродов позволило выявить диапазон проводимостей в котором роль эффекта Вина должна быть определяющей. Это достаточно высокие проводимости, порядка 10 нСм/м. Для экспериментального исследования ЭГД-течений, обусловленных эффектом Вина была создана специальная кювета (рис.4.45), имеющая форму параллелепипеда и содержащая два плоских медных электрода и перегородку, выполненную из тонкого органического стекла, разделяющую объем кюветы на две равных части. В середине перегородки имеется малое отверстие. Кювета заполнялась жидким диэлектриком – раствором бутанола в трансформаторном масле. При подаче на электроды напряжения через жидкость потечет электрический ток, и у поверхности изолирующей пластины с обеих сторон будет накапливаться электрический заряд. При этом силовые линии поля изменят свое направление и пройдут через отверстие в органическом стекле. В результате подобного процесса, реализуется ситуация, когда максимальная напряжённость будет достигаться не у поверхности электродов, а в объеме кюветы, в середине межэлектродного промежутка вблизи отверстия в твёрдой изоляции. Напряженность поля у электродов оказывается значительно ниже, что позволяет выбрать режим, когда инжекция с поверхности электродов вообще отсутствует. Подобный случай уникален тем, что в области повышенной напряжённости электрического поля исключено возникновение инжекции (из-за отсутствия электродов), но, в то же время, возможно проявление эффекта усиления интенсивности диссоциации под действием электрического поля. Таким образом, исследование структуры ЭГД-течений вблизи отверстия в поверхности твёрдого диэлектрика позволяет исследовать в чистом виде роль эффекта Вина в формировании объёмного заряда и возникновении ЭГД-течений в жидких диэлектриках.

На рис.4.45 приведено распределения напряженности поля в окрестности отверстия, рассчитанное в электростатическом приближении, видно, что силовые линии поля проходят сквозь отверстие, а максимальная напряжённость достигается по краям отверстия. Для регистрации распределения поля скоростей ЭГД-течение использовался метод лазерной анемометрии PIV), реализованный с использованием оборудования Flow Master компании La Vision.

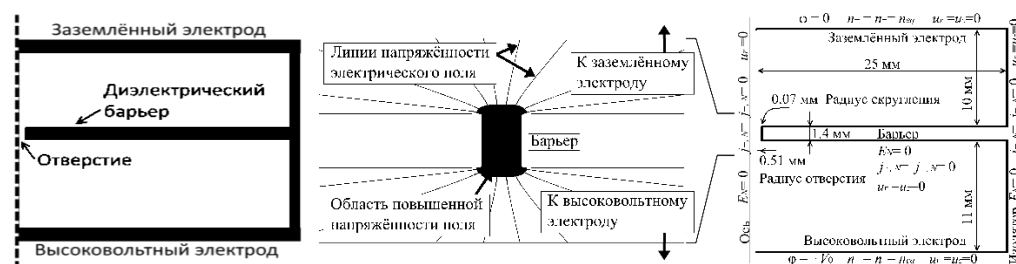


Рис. 4.45 (а) Схема половины экспериментальной кюветы(слева), (справа) иллюстрация распределения электрического поля в межэлектродном промежутке и в отверстии, (б) граничные условия компьютерной модели.

Для проведения исследований было использовано трансформаторное масло, в которое было добавлено контролируемое количество бутилового спирта. Свойства жидкости: плотность $\gamma = 870 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\eta = 0.024 \text{ Па} \cdot \text{с}$, подвижности ионов $b = 10^{-9} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, коэффициент диффузии $D = 2.5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, температура $T = 296 \text{ К}$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2.5$. Как показали измерения, повышение концентрации бутанола на несколько процентов практически не влияет на значение диэлектрической проницаемости, но заметно изменяет проводимость, измерение которой проводилось во время каждого эксперимента. Эксперименты показали, что заметные ЭГД-течения возникают в жидкости с уровнем низковольтной проводимости 10 нСм/м . Экспериментально зарегистрированная структура ЭГД-течения весьма необычна: в каждом из полу объемов, возникают зеркально-симметричные течения, представляющие собой узкую струйку жидкости, направленную из объема на отверстие, ускоряющуюся по направлению к отверстию и особенно в зоне внешней границы отверстия под острым углом к поверхности изолирующей пластины. Скорости течения в зоне ускорения весьма высоки, порядка 1 м/с , струйки очень тонкие, а течение ламинарно. После ускорения в области краев отверстия поток растекается вдоль изолирующей пластины и испытывает быстрое торможение. Об этом можно судить по форме линий тока жидкости, быстро сужающихся по направлению к отверстию и расширяющихся после него. Течение противонаправлено типовому ЭГД-течению от игольчатого электрода. Это, по-видимому, связано с локализацией максимума напряженности поля и объемного заряда по краям отверстия и будет детально проанализировано в следующей главе по результатам моделирования.

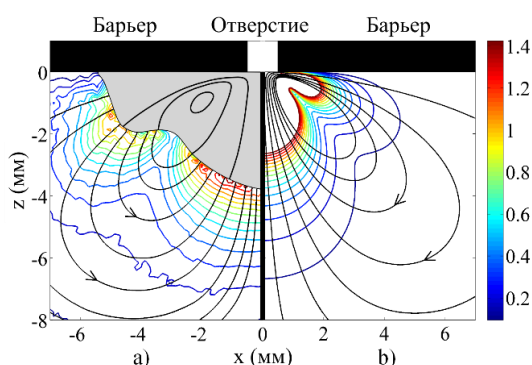


Рис. 4.46 Контур скорости (см/с) и линии тока жидкости: (а) эксперимент (в серой области удалось восстановить только линии тока), (б) моделирование.

ВАХ имеет только линейный участок. Эффект усиленной полем диссоциации обусловлен тем, что предложенная конфигурация кюветы позволяет эффективно усиливать напряжённость электрического поля в области отверстия. Таким образом, показан, что эффективное усиление диссоциации примесных молекул в объеме жидкости при гарантированном отсутствии инжекции с электродов, обусловлено объемным эффектом Вина. Увеличение проводимости жидкости весьма существенно. Так, в частности, при напряжении 25 кВ ток в системе более чем в 2.5 раза превышает то значение, которое должно было бы получиться в линейной модели (т.е. при отсутствии эффекта Вина).

Таким образом: полученная совокупность экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, предложенная конструкция кюветы с твёрдой диэлектрической вставкой действительно позволяет создавать область повышенной напря-

В связи с чрезвычайно высокими ускорениями в области отверстия и высоким сгущением линий тока надежно исследовать скоростную картину удалось только на некотором удалении от отверстия, поэтому зона неопределенности на графике рис 4.46 обозначена серым цветом. Ранее в главе 2.22 представлена вольтамперная характеристика ячейки. Проводимость жидкости в данном эксперименте составила $\sigma = 8.9 \cdot 10^{-9} \text{ См/м}$. Она имеет традиционных два участка: низковольтный линейный и высоковольтный- нелинейный. Последний появляется только благодаря усиленной полем диссоциации в области отверстия, без перегородки

жённости электрического поля в объёме жидкости вдали от поверхности самих электродов; при этом падение практически всей разности потенциалов происходит в области отверстия. Поэтому данная система имеет нелинейную вольтамперную характеристику, причём эта нелинейность обусловлена исключительно эффектом Вина. Более того, именно эффект Вина приводит к возникновению зарегистрированных ЭГД-течений и, соответственно, его необходимо учитывать, особенно в случае сравнительно высоких значений проводимости рабочей жидкости.

Заключение.

1. Анализ полученных данных позволил выявить и описать структурные особенности ЭГД-течений инжекционного типа в ограниченном объеме в широком диапазоне напряжений, проводимостей, геометрии и материала электродов, концентрации различных примесей.
2. Сопоставление результатов, полученных по авторской методике с результатами, полученными при помощи PIV –метода на современной установке лазерной анемометрии подтвердило достоверность полученных результатов и сделанных выводов о структуре ЭГД-течений инжекционного типа в ограниченных объемах.
3. Анализ ячеистой структуры ЭГД-течений в несимметричных системах электродов типа провод (игла) над плоскостью показал, что силовая часть течения сосредоточена в области центральной струи. Выявлена зонная структура центральной струи в различных условиях в зависимости от напряжения, проводимости, степени неоднородности электрического поля, состава примесей и материала электродов.
4. Предложены и исследованы интегральные безразмерные характеристики ЭГД-течений: электрическое число Рейнольдса и приведенный ток и их зависимость от различных факторов.
5. Всесторонне исследованы ЭГД-течения инжекционного типа в симметричной системе электродов в условиях биполярной инжекции в канале. Описаны особенности структуры центральных струй встречных и сквозного ЭГД-течений. Получены и исследованы структурные особенности центральных струй таких течений в зависимости от концентрации электронно-акцепторной примеси. Описана зонная структура и зона рекомбинации встречных и сквозного ЭГД-течения. Получено и подробно исследовано сквозное ЭГД-течения, возникающее в каналах при различных уровнях инжекции на электродах.
6. Исследовано ЭГД-течение обусловленное эффектом Вина в области повышенной диссоциации, находящейся вдали от электродов.

Литература к главе 4.

- 4.1 Остроумов Г.А. Наблюдение электрокондуктивной конвекции в электролитах/ Г. А. Остроумов // Журнал экспериментальной и технической физики. – 1955. – Т. 29. – № 4 (10). – С. 529–532.
- 4.2 Остроумов Г.А. Некоторые гидродинамические явления, сопровождающие прохождение тока через изолирующие жидкости / Г. А. Остроумов // Журнал экспериментальной и технической физики. – 1956. – Т. 30. – № 2. – С. 282–286.
- 4.3 Петриченко Н.А. Электрический ветер в изолирующих жидкостях: Автореф. канд. дис. Л., 1973, с.15.
- 4.4 Стишков Ю.К. Исследование электрической конвекции в слабопроводящих жидко-

- стях методом проводящих светорассеивающих ингредиентов // Тез.докл. Всесоюз. конф. "Современные проблемы тепловой гравитационной конвекции. Минск. 1971.
- 4.5 Стишков Ю.К. Наблюдение изотермической конвекции в электрическом поле плоского конденсатора // Электронная обработка материалов. 1972. №1, с. 61-62.
 - 4.6 Стишков Ю.К. Электрокондуктивная конвекция в слабопроводящих жидкостях // Электронная обработка материалов. 1975. №4, с. 29-33.
 - 4.7 Стишков Ю.К., Михайлов А.А. Крупномасштабная демонстрация некоторых ЭГД-течений в жидких диэлектриках // Тез. докл. 8-го Рижского совещ. по магнитной гидродинамике. Рига. 1975. Т.1, с.159-160.
 - 4.8 Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. //Физические основы электрогидродинамики // М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 320 с.
 - 4.9 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 174 с.
 - 4.10 Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Николаев П.О., Стишков Ю.К. Полуавтоматический метод компьютерной обработки поля скоростей ЭГД-течений // Электронная обработка материалов, 2007, № 1 (243). С. 24-30.
 - 4.11 Daaboul M., Louste Ch. and Romat H. PIV Measurements on Charged Plumes – Influence of SiO₂ Seeding Particles on the Electrical Behavior // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. Vol. 16. No. 2. P. 335–342.
 - 4.12 Стишков Ю.К. Исследование электрогидродинамических эффектов при помощи нелинейного оптического эффекта. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета, Из-во СПбГУ, 2000
 - 4.13 Стишков Ю.К., Статуя А.А., Криворучко С.А. Применение нелинейного оптико-электрогидродинамического эффекта для исследования нестационарных ЭГД-течений // Сборник докладов X-ой Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2012. – С. 3
 - 4.14 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Использование метода лазерной анемометрии по изображениям частиц для исследования кинематики электрогидродинамических течений // Сборник научных трудов IV всероссийской научной конференции "Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем" – г. Ставрополь, – 2013. – С. 3-8
 - 4.15 Стишков Ю.К., Михайлов А.А. Некоторые электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках // Магнитная гидродинамика. 1977. №2, с.76-80
 - 4.16 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Границы существования ЭГД-течений в гомогенных жидкостях // Электронная обработка материалов. 1981. №4, с.62-65.
 - 4.17 Стишков Ю.К. Структура центральной струи и интегральные характеристики развитого ЭГД-течения //Магнитная гидродинамика. 1984 №3, с.136-139.
 - 4.18 Стишков Ю.К. Остапенко А.А. Зависимость интенсивности электрогидродинамических течений от низковольтной проводимости жидкости // Тез.докл. 9-го Рижского совещ. по магнитной гидродинамике. Рига. 1978. Т.1, с.176-177.
 - 4.19 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. ЭГД-течения и процессы ионообразования в слабопроводящих жидкостях // Тез.докл. 3-й Всесоюз. школы-семинара по магнитным жидкостям. Плес.1983, с.237-238.
 - 4.20 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения постоянного

- тока и низковольтная проводимость // Тез.докл. Всесоюз. науч. конф. "Физика диэлектриков и новые области их применения". Караганда, 1978.
- 4.21 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Зависимость интенсивности и КПД электрогидродинамических течений от низковольтной проводимости жидкости // Магнитная гидродинамика. 1979. №1 с.74-79.
 - 4.22 Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Русанова Л.Д. Кинематика и динамика ЭГД-течений // Тез. докл. 3-й Всесоюз.конф. "Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности". Николаев. 1984, с.95-96.
 - 4.23 Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Петрова М.Ю. Влияние свойств материала электрода на проводимость и кинематику ЭГД-течений в изооктане // Тез.докл. 4-й Всесоюз. конф. по магнитным жидкостям. Плес.1985,с. 118.
 - 4.24 Ю.К. Стишков, А.А. Ситников, В.А. Чирков. Исследование структуры ЭГД-течений при помощи PIV-метода // Сборник докладов XI Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики", Санкт-Петербург (Россия), 29 июня – 3 июля 2015, 2015. – Р. 49-54
 - 4.25 Ю. К. Стишков, А. А. Остапенко. "Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках", Л.: Издат. Ленинградского университета, 1989, 174 с.
 - 4.26 Ю. К. Стишков, Остапенко А.А., Рычков Ю.М. Объемный заряд и ЭГД-течения в симметричных системах электродов // Электронная обработка материалов. 1982. №1.
 - 4.27 Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Чистяков Н.А. ЭГД-течения в системе взаимно параллельных проволок // Магнитная гидродинамика. 1982. №3.
 - 4.28 Буянов А.В., Стишков Ю.К. Особенности структуры сквозного электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов // ЖТФ. 2004. Том 74. Вып. 8. С. 120–123.
 - 4.29 Буянов А.В., Стишков Ю.К. Особенности кинематической структуры электрогидродинамического течения в системах электродов "провод-провод" и "провод-плоскость" // ЖТФ, 2003, том 73, вып. 8. С. 34-39.
 - 4.30 Ilya Ashikhmin, Yury K. Stishkov, Yaroslav Donskov Experimental Study of EHD flows in symmetric electrode system in wide range of low-voltage conductivities // Proceedings of International Symposium on Electrohydrodynamics, ISEHD 2014, Okinawa, Japan, 2014. – P. 1-4
 - 4.31 Ashikhmin I.A., Stishkov Y.K. Influence of the level of the low-voltage conduction on the structure of the through electrohydrodynamic flow in a symmetric electrode system // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2014. – Vol. 50, – № 3. – P. 246-252.
 - 4.32 В.А. Чирков, Д. К. Комаров, Ю.К. Стишков, С.А. Васильков. Численное и экспериментальное исследования ЭГД-течений вблизи поверхности твёрдого диэлектрика // Сборник докладов XI Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики", Санкт-Петербург (Россия), 29 июня – 3 июля 2015, 2015. – С. 122-126.
 - 4.33 V. A. Chirkov, Yu. K. Stishkov, S. A. Vasilkov PIV Investigation of EHD Flow Caused by Field-enhanced Dissociation // Proceedings of 10th Conference of the French Society of Electrostatics, 2016. – P. 1-4

ГЛАВА 5. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ИНЖЕКЦИОННОГО ТИПА

ЭГД-течения представляют собой сложный электрофизический процесс, и их компьютерное моделирование до недавнего времени представляло собой непростую задачу. Сложность численного расчёта заключается в сильной нелинейности уравнений и в непосредственной зависимости всех переменных друг от друга. В последнее время появились системы компьютерного моделирования, позволяющие решать подобные задачи.

Наиболее удобным и перспективным для моделирования ЭГД-течений в настоящее время является использование пакета COMSOL Multiphysics, основанного на методе конечных элементов. Его основные особенности:

- возможность совместного решения нескольких типов уравнений (в данном случае – уравнения Нернста-Планка, Навье-Стокса и Пуассона);
- все уравнения явно выписаны, и в них можно изменять любые параметры;
- простота построения модели и задания условий;
- наличие прямого решателя,

Уравнения электрогидродинамики и безразмерные параметры [5.1-5.3].

Система уравнений электрогидродинамики (1)–(9) для несжимаемых изотермических жидких диэлектриков и трёх ионной модели проводимости в безразмерном виде стоят из: (1) – уравнения Пуассона (1), (2)–(4) – трех уравнений Нернста-Планка для слабых электролитов, (6) – определения объемного заряда, (7) – определения плотности тока, (8)–(9) – уравнений гидродинамики.

$$\frac{P_\xi}{2} \rho' = -\Delta' \varphi' \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial n_1'}{\partial t'} + \operatorname{div}'(\vec{j}_1) = P_\xi (1 - n_1' n_2') \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial n_2'}{\partial t'} + \operatorname{div}'(\vec{j}_2) = P_\xi (1 - n_1' n_2' - n_3' n_2') \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial n_3'}{\partial t'} + \operatorname{div}'(\vec{j}_3) = -P_\xi n_3' n_2' \quad (5.4)$$

$$\rho' = n_1' - n_2' + n_3' \quad (5.5)$$

$$\vec{j}_i = -P_D \vec{\nabla}' n_i' + z_i n_i' \vec{E}' + n_i' \vec{u}'; i = 1, 2, 3 \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial \vec{u}'}{\partial t'} + (\vec{u}' \cdot \nabla') \vec{u}' = -2 \nabla' P' + P_R \Delta' \vec{u}' + P_\xi M \rho' \vec{E}' \quad (5.7)$$

$$\vec{\nabla}' \cdot \vec{u}' = 0 \quad (5.8)$$

$$P_\xi = \frac{L^2 \sigma_0}{b \varphi_0 \varepsilon \varepsilon_0}; P_D = \frac{D}{b \varphi_0}; P_C = \frac{L^2 \sigma_0}{2 b^2 \eta}; P_R = \frac{\eta}{b \varphi_0 \gamma} \quad (5.9)$$

где ρ – объемная плотность заряда, ε – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, φ – электрический потенциал, n_1 , n_2 и n_3 – концентрации диссоциированных положительных и отрицательных и инжектированных положительных ионов соответственно, j – плотность тока ионов, γ – плотность жидкости, \vec{u} – скорость жидкости, P – давление, η – вязкость жидкости, \vec{E} – напряженность электрического поля, D – коэффициент диффузии, z_i – валентность ионов, b – подвижность ионов, e – элементарный заряд. Безразмерные параметры задач электрогидродинамики имеют следующий физический смысл: P_ξ отношение характерного времени миграции ионов через МЭП к времени Максвелловской релаксации, P_D – параметр диффузии, P_R – вязкостный параметр, P_C – силовой параметр. P_ξ аналогичен параметру P использованному ранее. Обычно задачи электрогидродинамики требуют много ионной постановки. В общем случае каждый сорт ионов имеет индивидуальное значение подвижности и валентности. Однако подвижности и валентности ионов, как правило, неизвестны и определяются по данным о вязкости среды [5.5]. Поэтому для упрощения ряда задач валентность ионов выбирается единичной, а подвижность и коэффициент диффузии ионов считаются равными по абсолютной величине для всех сортов ионов. В отдельных задачах это не так и оговорено в их постановке.

Сложность численного расчёта системы ЭГД-уравнений заключается в сильной нелинейности уравнений и в непосредственной зависимости переменных друг от друга. Поэтому прежде чем перейти к описанию методики моделирования ЭГД-течений, рассмотрим более простые задачи с течениями, вызванными объемной силой [5.4]. Математическим описанием таких задач является уравнение Навье-Стокса (8) и уравнение неразрывности (9).

Класс течений с объёмной нагрузкой включает: естественную конвекцию ($\vec{f}_{\text{внеш.}} = \Delta \gamma \cdot \vec{g}$, где \vec{g} – ускорение свободного падения), 2) магнитную гидродинамику ($\vec{f}_{\text{внеш.}} = \mu [\vec{j}, \vec{H}]$, где μ – магнитная проницаемость жидкости, \vec{H} – напряжённость магнитного поля) и 3) электрогидродинамику ($\vec{f}_{\text{внеш.}} = \rho \vec{E}$). А также есть ряд смешанных задач, в которых одновременно действуют несколько типов внешних сил разной природы.

Наиболее простой вариант это тот, в котором распределение объёмных сил однородно и однонаправленно в заданной области, а область имеет вид узкой полоски. Рассмотрим прямоугольную кювету с жидкостью, в центре которой в прямоугольной области задана однородная объёмная сила, действующая вдоль оси “у”, а на стенках кюветы задано условие прилипания. На рис. 5.1 представлены результаты решения – контурный и осевой графики скорости, которые нормированы на свои максимальные значения.

В области приложения сил формируется тонкая центральная струйка жидкости, направленная вдоль силовой полоски и ускоряющейся на участке действия сил. Следует заметить, что течение с объёмной нагрузкой направлено из области пониженного давле-

ния в область повышенного. Наиболее информативными являются линейные распределения компонент скорости и их производных. На рис. 5.1 (справа) представлено продольное распределение скорости вдоль центральной струи. Характер этого распределения определяется безразмерным силовым параметром P_R . Вертикальные пунктирные линии на графиках соответствуют верхней и нижней границам области действия объёмной силы. Благодаря наличию небольшого градиента давления разгон жидкости начинается немного выше области действия объёмной силы. Далее расположена область интенсивного ускорения, которая простирается практически вплоть до конца силовой области, и затем сменяется зоной торможения.

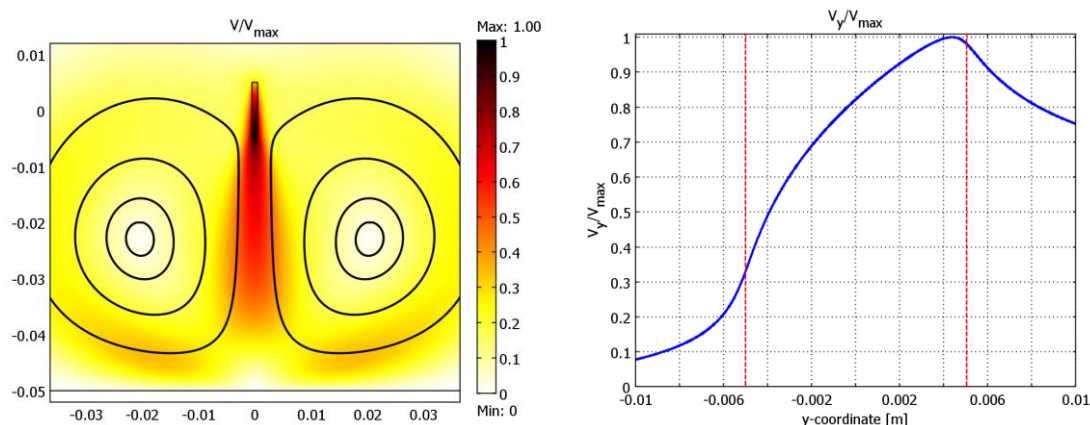


Рис. 5.1. Контурный график скорости и линии тока жидкости (слева) и распределение y -компоненты скорости вдоль центральной струйки течения (справа); вертикальные пунктирные линии на правом рисунке соответствуют началу и концу полосы действия объёмной силы.

На рис. 5.2 представлены распределения модуля безразмерной скорости и её градиента поперек центральной струи. Вертикальные пунктирные линии на графиках соответствуют левой и правой границам области действия объёмной силы. Профили скорости центральной струи силового течения имеют специфический Гуссов характер – скорость жидкости максимальна в середине силовой полосы и плавно спадает вне ее:

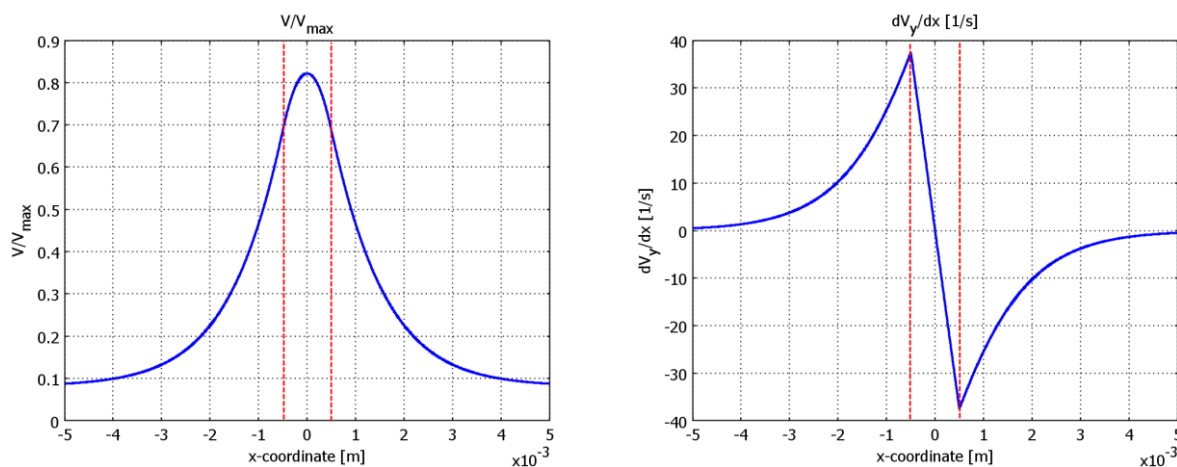


Рис. 5.2. Распределения нормированной скорости (слева) и её градиента (справа) вдоль поперечного направления; вертикальные пунктирные линии соответствуют границам полосы действия объёмной силы.

Что касается поперечной производной от модуля скорости, то она линейна внутри силовой полосы и имеет изломы на границе области приложения сил, что является отли-

чительным признаком перехода от силового течения внутри струи к вязкому снаружи. Этот эффект можно использовать для определения реальной толщины области приложения сил в течениях с объёмной нагрузкой, например, по экспериментальным данным об их кинематической структуре.

Особенности компьютерного моделирования ЭГД-течений при инжекции в непроводящую жидкость.

Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках могут возникать при инжекции ионов и под воздействием эффекта Вина. В пределах настоящей главы рассмотрим ЭГД-течения в замкнутых объемах, возникающие в результате инжекции. Инжекцию проще исследовать в несимметричной системе электрод, типа игла (провод) над плоскостью. В начале рассмотрим наиболее простую модель: инжекция в непроводящую жидкость. В этом случае при моделировании ЭГД-течений используется униполярная система уравнений электрогидродинамики, т.е. проводится совместное решение уравнений Нернста–Планка, одного уравнения Навье–Стокса и Пуассона. Два из трёх уравнений являются нестационарными, поэтому проводится переходной анализ. В задаче три характерных времени установления процессов: характерное время миграции, т.е. время формирования заряженного приэлектродного слоя, характерное время конвекции, т.е. время пересечения струей межэлектродного промежутка; кроме того, в задаче имеется еще одно характерное время – это время Максвелловской релаксации заряда. Эти времена могут существенно различаться. Поэтому полное время решения, а также интервалы характерных времен выбираются так, чтобы проследить процесс формирования приэлектродного слоя, а также процесс развития ЭГД-течения и получить окончательные стационарные распределения искомых функций, т.е. скорости ЭГД-течений, давления, объемного заряда и напряженности электрического поля. Для системы электродов игла над плоскостью задача осесимметричная, для электродов провод над плоскостью задача двумерная.

Для каждого из уравнений задаются граничные условия. Для уравнения Навье–Стокса это условия прилипания на стенках и на электродах и равенство нулю нормальной компоненты скорости на оси модели. Для уравнения Пуассона – значения потенциалов на электродах и равенство нулю нормальной компоненты поля на оси модели и на стенках. Для уравнения Нернста–Планка – условие на плотность тока: равенство нулю потока частиц через стенки и ось симметрии, условия гибели и рождения заряда на электродах. Свойства рабочей жидкости соответствуют трансформаторному маслу: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2.2$, механическая плотность $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\eta = 0.02 \text{ Па}\cdot\text{с}$, подвижность ионов $b = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Для облегчения решения задачи задавался повышенный коэффициент диффузии $D = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Тем не менее, поскольку диффузией в подобных задачах, как правило, можно пренебречь, выбранное значение не исказит получаемых результатов, но зато повысит стабильность решения и облегчит численный счёт. Далее при анализе решения будет приведен анализ этого допущения.

Напомним, что инжекция протекает, когда заряд с электрода переходит на примесную молекулу, обладающую электроноакцепторными (донорными) свойствами: $\text{C}^+ + e = \text{C}^\cdot$. Инжекция считается слабой, когда объемный заряд слабо влияет на исходное значение напряжённости электрического поля, рассчитанное без учета последнего. Разность потен-

циалов составляет 10 кВ. Инжекция определяется локальной напряженностью электрического поля E . Инжекция задается с использованием функциональной зависимости вида:

$$j(E) = 0.1 \left[\frac{A}{M^2} \right] \cdot \exp \left(-\frac{6.8 \cdot 10^7}{E} \right) \quad (5.10)$$

Анализ процесса установления течений в системе электродов провод над плоскостью [5.6, 5.7].

Рассматривался случай униполярной инжекции, т.е. распределение объёмного заряда в системе определяется только концентрацией положительных ионов, т.к. отрицательного заряда в системе нет. При нулевой проводимости нейтральные молекулы не диссоциируют, в системе также отсутствует рекомбинация. Для упрощения задачи верхняя половина проволочного электрода покрыта изоляцией. Поэтому заряд инжектируется только с нижней половины проволочного положительного электрода и нейтрализоваться может только на отрицательном электроде.

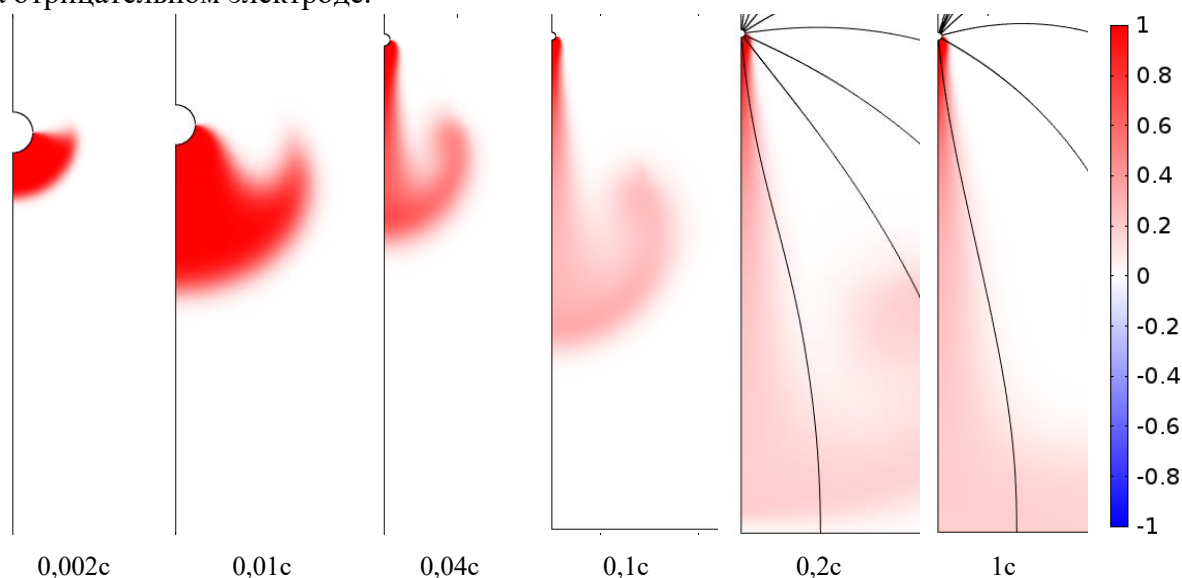


Рис. № 5.3. Распределение плотности объёмного заряда $0,01 \text{ К/м}^3$ в различные моменты времени в центральной струе ЭГД-течения для жидкости с нулевой низковольтной проводимостью.

На рис. 5.3 приведены последовательные во времени этапы формирования центральной зарядовой струи и ЭГД-течения от цилиндрического электрода диаметром 160 мкм. при включении напряжения 10 кВ в жидкости с нулевым уровнем низковольтной проводимости. В начальные моменты времени положительные ионы инжектируются с нижней половины проволочного электрода. После чего они мигрируют под действием силы Кулона вдоль силовых линий электрического поля, образуя полукольцевой слой вокруг положительного электрода, содержащий положительный объёмный заряд. Через 0,01 сек. из гомо слоя начинает формироваться заряженная струйка, с характерной грибовидной головкой, которая быстро двигается в направлении противэлектрода. Струйка за 0,2 сек. пересекает межэлектродный промежуток и продолжает распространяться вдоль отрицательного электрода. Плотность заряда в струе уменьшается при удалении от проволочного электрода из-за диффузного расширения струи. В остальной части жидкости заряд практически отсутствует, поскольку ионы разряжаются на плоском противэлектроде. Поэтому силовому воздействию подвергается только заряженная центральная струя. Ситуация очень похожа на случай с силовой полоской, рассмотренный выше, однако в

нашем случае Кулоновские силы существенно неоднородны вдоль и поперек центральной струи. Это отражается на скоростных характеристиках ЭГД-течения, приведенных на рис. 5.3. На начальных стадиях развития центральная струя затухает, не доходя до противоэлектрода, на более поздних упирается в плоский электрод. Далее это квалифицировано как неразвитой и развитой режимы ЭГД-течения.

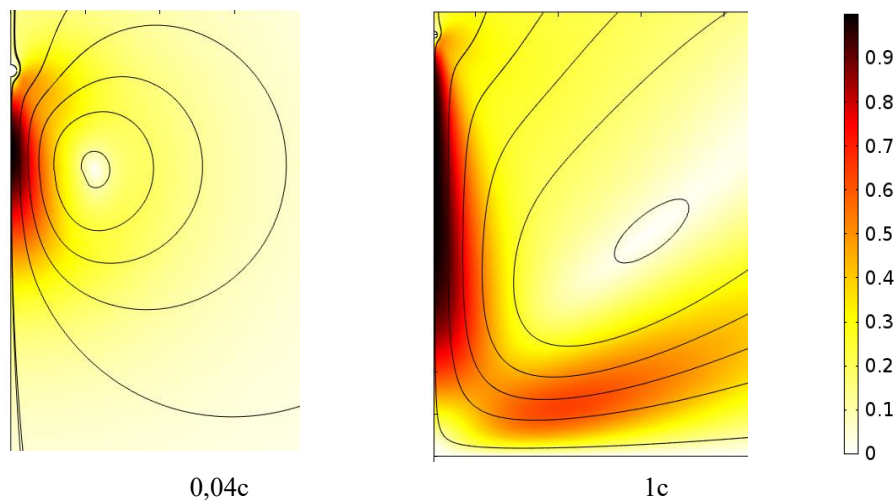


Рис. №5.3 Поле скоростей м/с в жидкости очень малой низковольтной проводимостью в различные моменты времени после включения напряжения.

На линейных графиках распределения плотности заряда (рис. 5.4, 5.5) отчетливо прослеживается движение заряженного фронта центральной струи. Зона ускорения жидкости мала и находится вблизи проволочного электрода. С увеличением продольных размеров заряженной струйки, в которой существуют объёмные силы, незначительно подрастает и зона ускорения. После зоны ускорения следует зона равномерного течения, за которой следует зона торможения у плоского электрода. У отрицательного электрода образуется область повышенного давления, разворачивающая течение на 90 градусов, направляя его вдоль поверхности электрода-плоскости, тем самым формируя замкнутый поток в кювете. При этом формируется второй максимум скорости и вторая зона ускорения, вызванная градиентом давления в центральной части плоского электрода. В установившемся режиме струя расширяется приблизительно в 2 раза по мере прохождения межэлектродного промежутка, что вызвано влиянием вязкого трения на границе струи.

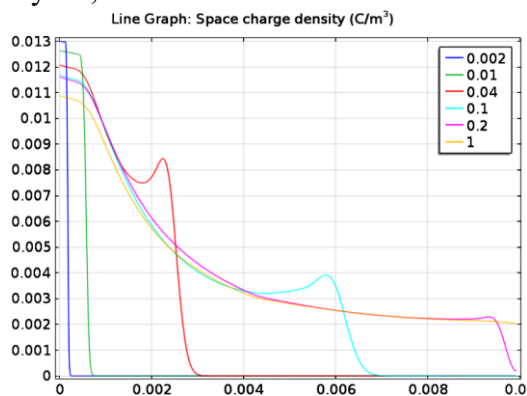


Рис. №5.4 Распределения плотности заряда по оси симметрии в различные моменты времени.

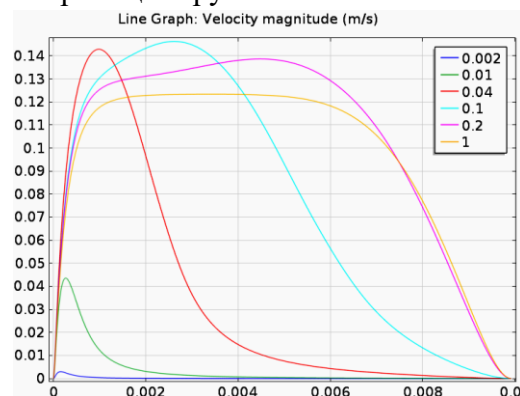


Рис. №5.5 Распределения скорости по оси симметрии в различные моменты времени

Рассмотрим процесс установления течений в другой системе электродов: игла над плоскостью [5.8, 5.9]. На рис. 5.6 представлены контурные графики объёмной плотности заряда (в логарифмическом масштабе) и траектории движения ионов в случае слабой инжекции. Они демонстрируют процесс формирования заряженной струи. На первых трёх графиках представлена приэлектродная область, а на остальных весь межэлектродный промежуток. Как отмечалось выше, инжекция происходит вдоль большей части поверхности иглы, а не только у её кончика, формируя слой заряда вдоль поверхности электрода. Из графиков видно, что в первые моменты времени пока жидкость ещё неподвижна траектории ионов, возникающих на поверхности игольчатого электрода, совпадают с силовыми линиями электрического поля и радиально расходятся от поверхности иглы (рис. 5.6 а, б). На этом этапе вокруг иглы происходит формирование заряженного слоя, внешняя граница которого практически повторяет форму электрода иглы. Далее на объёмный заряд в этом слое начинает действовать кулоновская сила, в этой области начинает формироваться центральная струйка ЭГД-течения, и траектории движения ионов изменяются. Так, заряд начинает распространяться преимущественно вместе с жидкостью, т.е. на этом этапе происходит увеличение роли конвективного тока. Ионы двигаются по касательной к боковой поверхности игольчатого электрода и далее вдоль оси симметрии модели. Распространяющаяся заряженная струя имеет гладкую боковую границу и характерную грибообразную головку. Через время, примерно равное 1τ , в системе устанавливается стационарное распределение заряда, которое затем практически не изменяется.

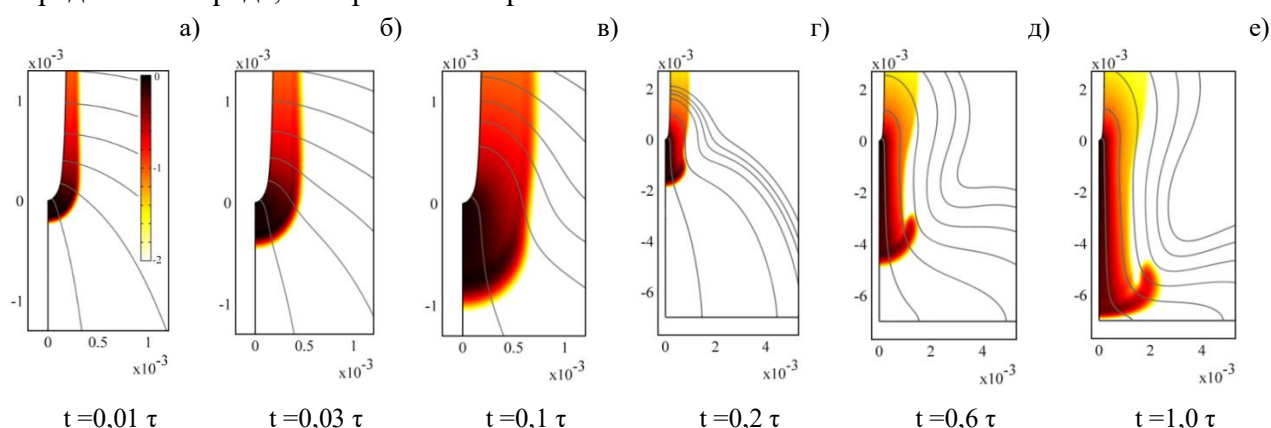


Рис. 5.6. Контурные графики нормированной объёмной плотности заряда в логарифмическом масштабе в разные моменты времени формирования центральной заряженной струи и траектории движения ионов; а, б, в – приэлектродная область; г, д, е – МЭП; максимальное значение плотности заряда $0,03 \text{ Кл/м}^3$, цветовая легенда одинакова для всех рисунков; $\tau = 0,11 \text{ с}$ (время замыкания струёй МЭП).

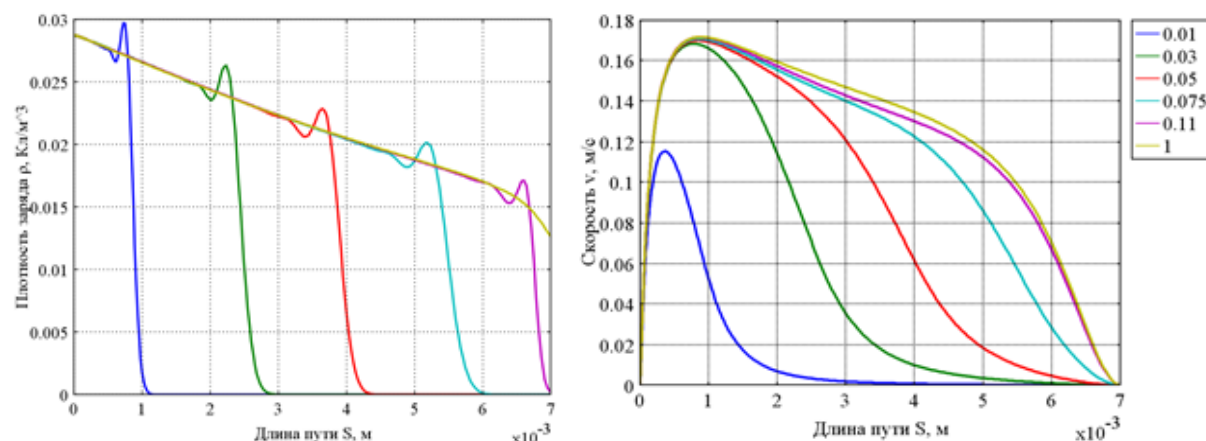


Рис. 5.7. Осевое распределение объёмной плотности заряда (слева) и скорости (справа) в выбранные моменты времени.

Объёмная плотность заряда (рис. 5.6, слева) непосредственно под заострением активного электрода достигает значения $0,03 \text{ Кл/м}^3$, и по порядку величины согласуется со значениями, полученным для электродов провод над плоскостью. При движении вглубь МЭП происходит плавное снижение плотности заряда, что, в свою очередь, приводит к уменьшению плотности кулоновских сил и проявляется в спаде скорости, определённой вдоль аналогичного пути (рис. 5.7, справа). Уменьшение плотности заряда объясняется размытием заряженной струйки за счёт миграционной компоненты плотности тока.

Максимальное значение скорости в МЭП достигается на расстоянии около 1 мм (от электрода) и составляет 17 см/с. Затем следует плавный спад скорости, который в конце МЭП сменяется зоной интенсивного торможения. Интенсивное торможение происходит в результате втекания жидкости в область повышенного давления, которая возникает из-за взаимодействия потока с неподвижным электродом. Этот вид течения имеет характерные особенности неразвитого течения.

На рис. 5.8 представлен контурный график и осевое распределение давления. Как видно из графика, под заострением игольчатого электрода расположена зона сильно пониженного давления – $P_{\min} = -200 \text{ Па}$. Наличие этой зоны обусловлено наличием неподвижного приэлектродного слоя, заряженного одноименно с электродом. Эта зона обуславливает ускорение жидкости при движении на подтоке к заострению электрода, так как движение происходит в направлении уменьшения давления. Тем не менее, наиболее интенсивное ускорение жидкости происходит под электродом в зоне действия кулоновских сил именно в направлении увеличения давления. В конце МЭП наблюдается небольшая область слегка повышенного давления, обусловленная столкновением струи с неподвижным электродом. Наличие этой зоны способствует повороту линий тока жидкости и растеканию центральной вдоль плоскости, с последующим формированием возвратного течения.

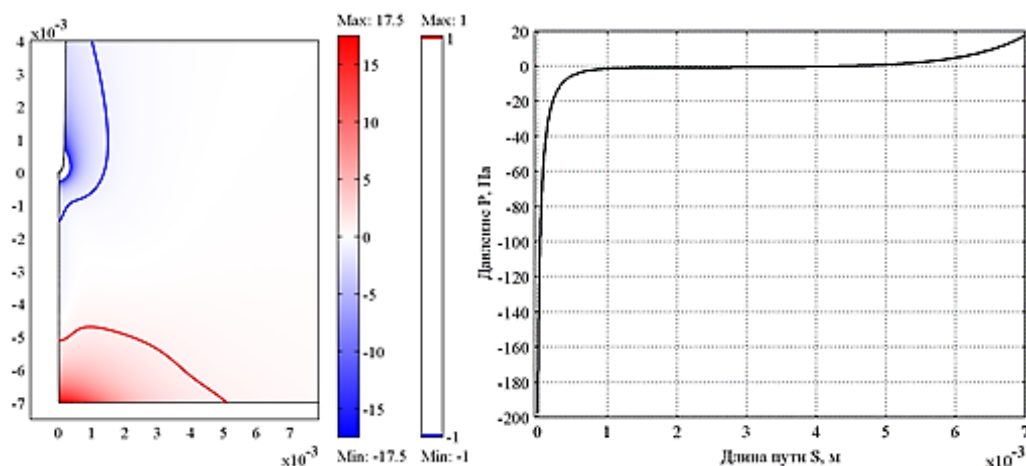


Рис. 5.7 Контурный график (слева) и осевое распределение давления (справа); на контурном графике цветовая палитра отображает только часть диапазона изменения давления.

Такие особенности распределения гидродинамических величин объясняются спецификой распределений напряжённостей поля и заряда, характерных для выбранной системы электродов. Локальная напряжённость электрического поля у кончика игольчатого электрода составляет 35 МВ/м, т.е. в несколько десятков раз, превышает своё среднее значение. Благодаря такому резко неоднородному электрическому полю инжекция заряда в системе электродов игла-плоскость становится существенной при сравнительно малых напряжениях. Столь высокая локальная напряжённость электрического поля у верхнего

электрода и большая плотность объёмного заряда, инжектированного в жидкость, обуславливают наличие и малые размеры (менее 1 мм) зоны интенсивного ускорения.

Анализ ампер-секундных характеристик при инъекции в непроводящую жидкость [5.10].

Влияние ЭГД-течений на процессы токопрохождения можно проследить на ампер-секундной характеристике (АСХ), т.е. на зависимости тока, протекающего через электроды, от времени. Рассмотрим соответствующие осциллограммы тока переходного режима установления ЭГД течений при импульсном включении напряжения в диапазоне от 5 до 20 кВ. На рис. 5.8 (слева) представлены рассчитанные АСХ, и маркерами отмечены моменты, когда заряженная струя замыкает МЭП. Поскольку

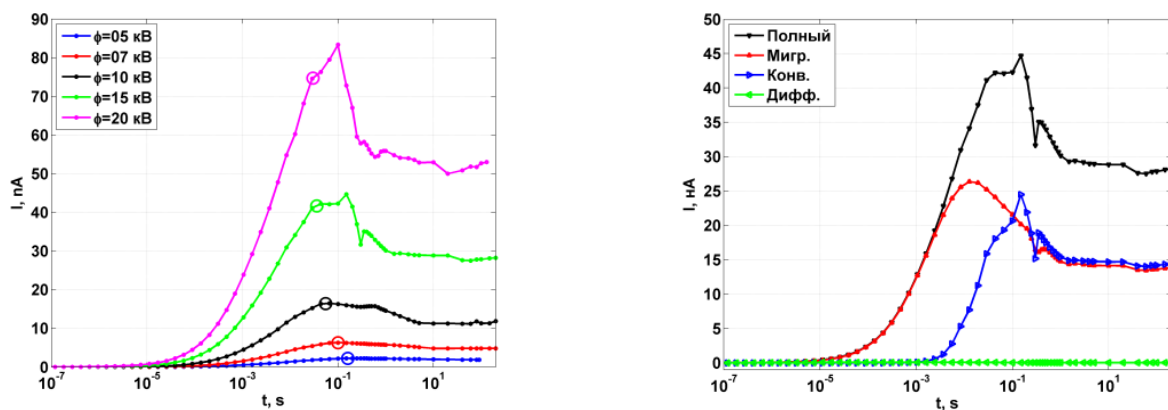


Рис. 5.8. АСХ переходного процесса установления тока при мгновенном включении напряжения) при разных напряжениях; маркерами ('o') отмечены моменты, когда заряженная струя замыкает МЭП (слева); осциллограммы миграционной, конвективной и диффузионной компонент и полного тока переходного процесса(справа).

в данном примере начальная проводимость жидкости нулевая, то все осциллограммы тока начинаются с нулевого уровня. Далее следует нарастание, достижение максимума и спад тока. Это типовой вид АСХ для случая доминирования инжекционного механизма зарядообразования. В случае слабой инжекции полученные осциллограммы гладкие и на них практически не наблюдается участка спада тока после достижения максимального значения. Угол наклона участка роста увеличивается при повышении напряжения. Кроме этого с ростом напряжения увеличивается спад тока после максимума, и возрастают стационарные значения тока. Особенностью случая высоких напряжений является то, что максимум тока перестаёт соответствовать моменту замыкания струёй МЭП. После замыкания наблюдается небольшой рост тока, связанный с возникновением боковых мелкомасштабных выбросы заряда.

На рис. 5.8(справа) представлены АСХ компонент тока при напряжении 15 кВ. Эти осциллограммы, также, как и предыдущие, рассчитывались согласно теореме Рамо-Шокли, где в качестве плотности тока использовалась каждая компонента тока по отдельности. Видно, что АСХ полного тока на начальном этапе (до 10^{-3} с) формирования приэлектродного заряженного слоя, т.е. до возникновения конвекции полностью совпадает с АСХ миграционного тока. Далее миграционный ток несколько спадает, а полный ток продолжает расти, благодаря конвективному переносу заряда. На этом этапе форма АСХ полного тока в точности повторяет форму АСХ тока конвекции. В частности, осцилляции полного тока (на временах около десятых долей секунды) определяются именно конвек-

тивной компонентой, колебания которой связаны с нестабильной инжекцией заряда в жидкость. Как уже отмечалось ранее, экранировка инжектированным объемным зарядом поля у поверхности активного электрода может привести к некоторым флуктуациям инжектируемого заряда, а, следовательно, и флуктуациям скорости ЭГД-течений. Кроме того, к флуктуациям тока приводят поперечные выбросы заряда из центральной струи, которые сносятся основным ЭГД течением, что приводит к временному усилению полного тока переносимого центральной струей. Боковые выбросы могут привести к усилению тока после замыкания центральной струей межэлектродного промежутка. Помимо прочего, можно отметить, что осциллограмма миграционного тока гладкая, а роль диффузионного тока на протяжении всего переходного процесса незначительна.

Анализ сил и энергии при движении элементов жидкости вдоль центральной струи ЭГД-течения.

Для более детального анализа процессов преобразования энергии рассмотрим баланс сил и энергий при движении элементарного объема жидкости вдоль линий тока центральной струи [5.11]. Закон сохранения энергии вдоль выделенной линии тока записывается в следующем виде:

$$\frac{\gamma u^2}{2} + P = \int_0^l (\vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_{\text{кул}}) \cdot d\vec{l} + \text{const} \quad (5.11)$$

т.е. сумма кинетической и потенциальной энергии жидкости изменяется только за счёт работы кулоновской силы и силы вязкого трения вдоль линии тока жидкости.

Проанализируем линию тока (рис. 5.9), которая проходит очень близко к оси модели внутри заряженной струи ($r_{\min} = 0,15$ мм), т.е. сквозь центральную струю ЭГД-течения, где наблюдаются максимальные скорости и градиенты давления.

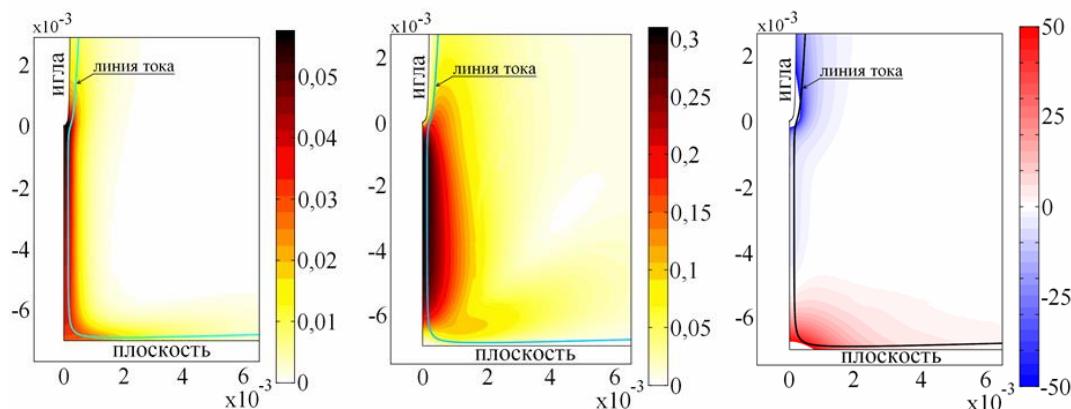


Рис. 5.9. Две линии тока жидкости, отображённые поверх графика объёмной плотности заряда (слева), скорости (посередине) и давления (справа).

На рис. 5.9 представлен график скорости жидкости вдоль основной части линии тока. Под основной частью понимается тот участок, который представлен на рис. 5.10. Вертикальные линии на рис. 5.9 соответствуют точкам наибольшего приближения линии тока жидкости к заострению иглы и к центру противозлектрода. Видно, что жидкость начинает разгоняться ещё на подтоке к заострению иглы (участок «1–2» на рис. 11, слева), затем следует стремительное ускорение («2–3»), зона квази однородного течения («3–4»), стремительное торможение («4–5»), излом графика («5»), и далее происходит плавное торможение («5–6»).

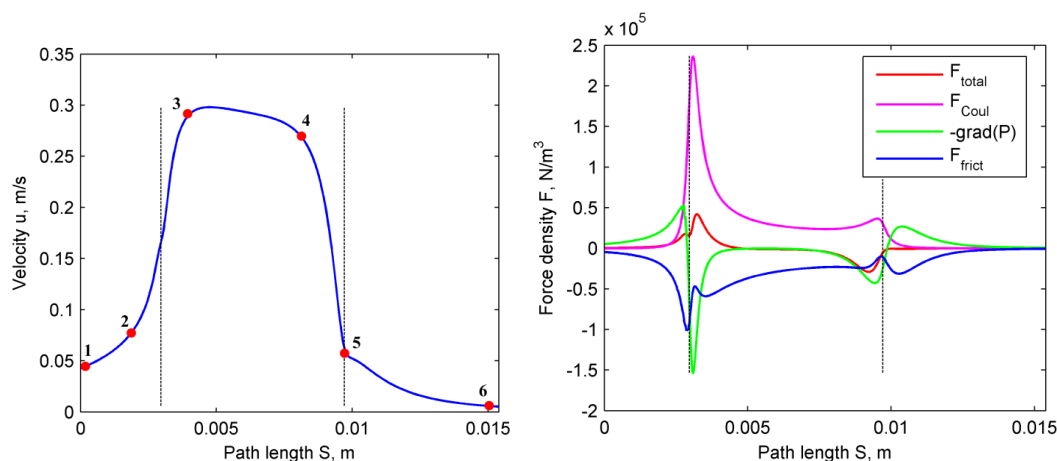


Рис. 5.10. Скорость (слева) и распределения плотностей сил (справа) вдоль линии тока; F_{total} , F_{Coul} , F_{frict} - плотности суммарной, кулоновской силы и силы трения, $-\text{grad}(P)$ - градиент давления с обратным знаком.

Для объяснения полученного распределения скорости необходимо рассмотреть соотношение сил на отмеченных участках. На участке «1–2» основными силами являются градиент давления и сила трения, действующие в противоположных направлениях. Их сумма (с учётом знака) обуславливает плавный разгон жидкости на подтоке к заострению иглы. Затем, на участке «2–3», происходит стремительное увеличение кулоновской силы, которая превосходит противоположно направленные силу трения и градиент давления и, в результате, приводит к интенсивному разгону жидкости. Далее градиент давления становится пренебрежимо малым, а кулоновская сила компенсируется силой трения, и на этом участке ускорение жидкости практически отсутствует («3–4»). На участке «4–5» происходит существенное увеличение по модулю градиента давления, связанное с тем, что жидкость втекает в зону повышенного давления в месте столкновения струи жидкости и противозэлектрода, и, в результате, поток существенно замедляется. В окрестности точки «5» происходит изменение направления течения, после чего она начинает двигаться перпендикулярно силовым линиям электрического поля вдоль плоскости («5–6»), что приводит к уменьшению до нуля проекции кулоновской силы на линию тока. Тем не менее, роль кулоновской силы не исчезает, но, более того, становится отрицательной, поскольку она прижимает жидкость к поверхности электрода и, тем самым, усиливает трение об него. В результате, на этом участке, происходит плавное торможение жидкости, обусловленное доминированием силы трения над градиентом давления. Таким образом оригинальная зонная структура центральной струи ЭГД-течения находит полное объяснение с позиций силовых воздействий.

Проанализируем баланс энергий. Из представленного распределения сил видно, что кулоновская сила совершает работу только при движении жидкости в промежутке от острия иглы и до противозэлектрода, а вне этого участка её работа, как и сама сила практически равна нулю. Следует отметить, что на этом отрезке работа кулоновской силы везде положительная. Сила вязкого трения, в отличие от кулоновской силы, действует на протяжении всего пути, и её работа – отрицательна. Теперь можно рассмотреть непосредственно баланс энергий вдоль линии тока. На подтоке к острию (участок «1–2» на рис. 11, слева) происходит увеличение кинетической энергии жидкости за счёт уменьшения её потенциальной энергии, однако это увеличение небольшое, поскольку ему препятствует расход энергии на работу силы трения. На относительно коротком участке «2–3» одновременно наблюдается рост как кинетической, так и потенциальной энергий, что происхо-

дит благодаря работе кулоновской силы. Далее на достаточно длинном участке однородного течения (отрезок «3–4») кинетическая и потенциальная энергии центральной струйки жидкости остаются практически постоянными, поскольку работа кулоновской силы компенсируется потерями на вязкое трение, передающее энергию периферийным областям жидкости. А далее, на участке «4–5», резкое замедление жидкости происходит именно из-за перехода её кинетической энергии в потенциальную. И лишь затем (отрезок «5–6») по мере спада потенциальной энергии основную роль играют потери на трение. Таким образом, зонная структура центральной струи ЭГД-течения имеет простой физический смысл: в зоне ускорения происходит преобразование электрической энергии в кинетическую энергию жидкости, в зоне «однородного» течения электрическая энергия расходуется в связи с потерями на вязкое трение, в зоне торможения кинетическая энергия преобразуется в потенциальную – повышенное давление, возникающее из-за соударения центральной струи со стенкой и изменяющее направление течения.

Влияние собственной проводимости жидкости на объемный заряд и структуру ЭГД-течений [5.12].

Неравновесный механизм формирования приэлектродных слоев реализуется как в плоской системе электродов, также и в несимметричных электродных системах типа игла-плоскость и провод-плоскость. Однако здесь необходимо учесть возможные ЭГД-течения. Рассмотрим результаты компьютерного моделирования процессов формирования слоев и ЭГД-течений в рамках трех ионной модели проводимости жидкости. Моделирование проведено в пакете COMSOL для системы электродов провод над плоскостью, расположенной в кювете из диэлектрического материала. В качестве рабочей жидкости выбрана жидкость со следующими свойствами: диэлектрическая проницаемость 2,2, плотность 800 кг/м^3 , динамическая вязкость $0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$; в жидкости имеются ионы, образованные за счет диссоциации примесных молекул, с подвижностью ионов $8,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, и третий положительный ион, образованный в приэлектродной реакции инжекции из молекулы примесей с подвижностью $4,25 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Радиус проволочного электрода $0,25 \text{ мм}$. Считается, что инжекция активна только у нижней части проволочного электрода, а верхняя половина покрыта изоляцией.

В процессе моделирования использовался метод динамических ДВАХ [5.12-5.14], т.е. метод линейного повышения напряжения с малой скоростью в диапазоне от $0,1 \text{ кВ}$ до 20 кВ . Этот диапазон включает низковольтный участок ВАХ, на котором проводимость равна равновесной, и высоковольтный, на котором активируется инжекция. Скорость изменения напряжения составляла 50 В/с , т.е. за время Максвелловской релаксации напряжение увеличивалось на малую величину: не более чем на 100 В . Таким образом в результате моделирования получена картина псевдо-установившихся ЭГД-течений в широком диапазоне напряжений.

Моделирование проводилось путем решения в системе Comsol ЭГД-уравнений для трех ионной модели (1)-(13), но записанной в размерном виде:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \text{div}(-c_1 b_{1,2} z_1 \nabla \varphi - D_1 \nabla c_1) + \vec{u} \nabla c_1 = a_d - a_{n,1} c_1 c_2 \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \text{div}(-c_2 b_{1,2} z_2 \nabla \varphi - D_2 \nabla c_2) + \vec{u} \nabla c_2 = a_d - a_{r1} c_1 c_2 - a_{r2} c_2 c_3 \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial c_3}{\partial t} + \text{div}(-c_3 b_3 z_3 \nabla \varphi - D_3 \nabla c_3) + \vec{u} \nabla c_3 = -a_{r2} c_2 c_3 \quad (5.15)$$

$$\rho = e(z_1 c_1 + z_2 c_2 + z_3 c_3) \quad (5.16)$$

$$\gamma \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \gamma(\vec{u}, \nabla) \vec{u} = -\nabla P + \eta \Delta \vec{u} - \rho \nabla \varphi \quad (5.17)$$

$$\text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (5.18)$$

Коэффициенты рекомбинации и диссоциации определяются следующим образом:

$$a_{r1} = \frac{2b_{1,2}e}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (5.19)$$

$$a_{r2} = \frac{(b_2 + b_3)e}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (5.20)$$

$$a_d = \frac{\sigma_0^2}{\varepsilon \varepsilon_0 2b_{1,2}e} \quad (5.21)$$

где α_{r1} – коэффициент рекомбинации отрицательных диссоциированных ионов с положительными диссоциированными ионами, α_{r2} – коэффициент рекомбинации отрицательных диссоциированных ионов проводимости с положительными инжектированными ионами, $b_{1,2}$ – подвижность диссоциированных ионов, b_3 – подвижность инжектированных ионов.

В правых частях уравнений Нернста-Планка (5.13-5.14) стоит “функция источника”, описывающая появление ионов первых двух типов в результате диссоциации молекул примеси и их гибель в результате рекомбинации положительных диссоциированных ионов с отрицательными и положительных инжектированных ионов с отрицательными диссоциированными ионами.

Развитие ЭГД-течений инжекционного типа в жидкости с проводимостью 10 пСм/м.

В начале рассмотрим процесс формирования центральной струи ЭГД-течения при включении напряжения. В жидкости с относительно невысокой собственной низковольтной проводимостью в отсутствии инъекции из-за недостатка гомозаряда у поверхностей электродов формируются приэлектродные рекомбинационные слои. Если с поверхности электродов не происходит инъекции, то приэлектродные рекомбинационные слои являются гетерозаряженными, т.е. содержат отрицательный заряд. При приложенном напряжении в системе наблюдается отличный от нуля ток, т.к. ток проводимости, протекающий через электроды, обуславливается присутствием свободных ионов в жидкости, т.е. ненулевой собственной проводимостью. Линии тока проводимости совпадают с силовыми линиями электрического поля из-за того, что миграционная компонента тока преобладает над остальными. В области высоких напряжений инъекция активизируется. Рассмотрим процессы, происходящие при включении напряжения 10 кВ. На рис. 5.11-5.12 приведены последовательные этапы формирования центральной струи ЭГД-течения в жидкости с низковольтной проводимостью 10 пСм/м. Временные этапы соответствуют этапам рис. 5.13. Видно, что на начальных этапах 0, 0,2 с в области верхней «изолированной» части электро-

да возникает полукольцевой неравновесный отрицательно заряженный слой, а с нижней неизолированной части полукольцевой слой инжектированного положительного заряда. Далее из

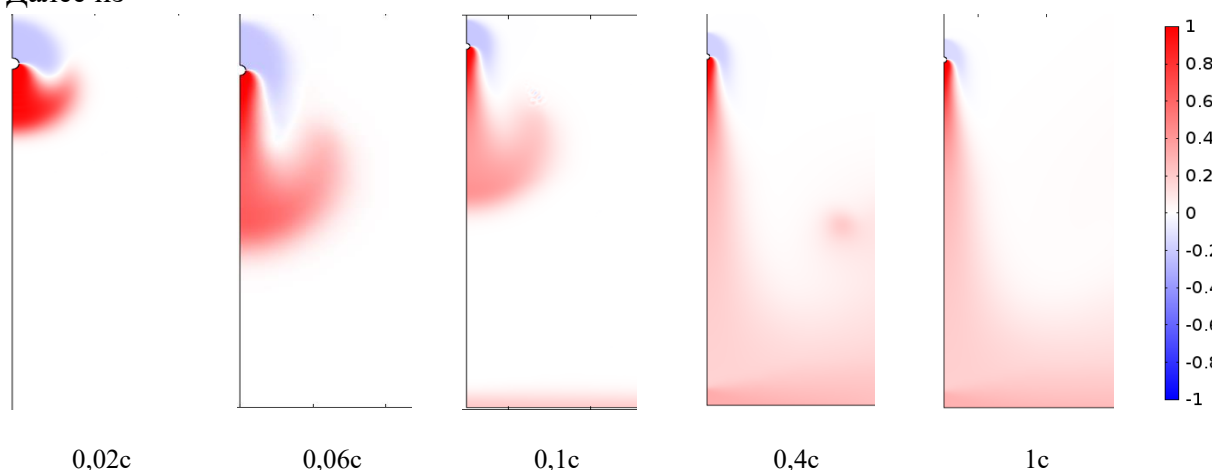


Рис 5.11 Распределение объёмного заряда в относительных единицах в центральной струе ЭГД-течения в различные моменты времени в жидкости с проводимостью $\sigma_0 = 10^{-11} \frac{\text{См}}{\text{м}}$.

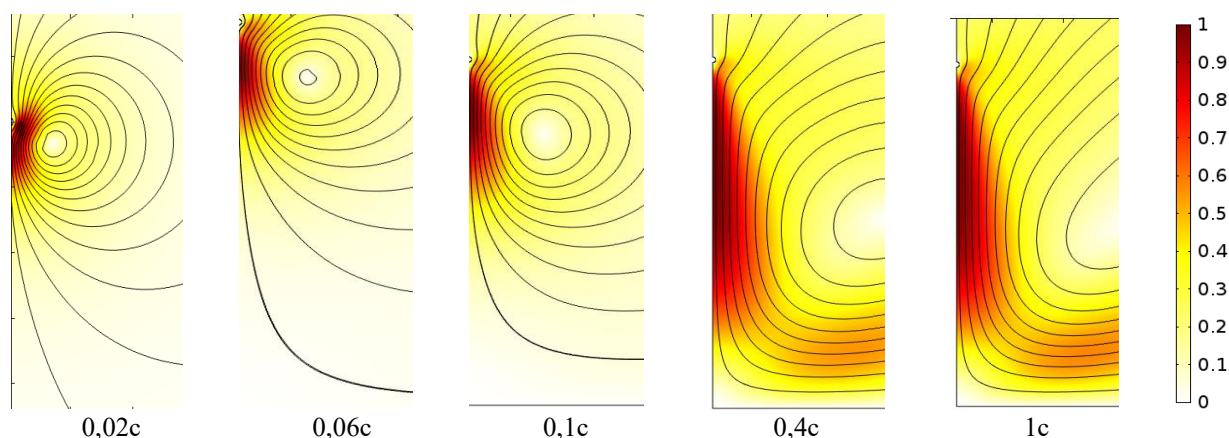


Рис 5.12 Поле скоростей центральной струи в относительных единицах в межэлектродном промежутке в различные моменты времени в жидкости с проводимостью $\sigma_0 = 10^{-11} \frac{\text{См}}{\text{м}}$.

слоя инжектированного заряда формируется тонкая струйка заряженной одноименно с проволочным электродом жидкости движущаяся с повышенной скоростью через нейтральную жидкость, которая пересекает межэлектродный промежуток за 0,2 с. Эта струйка переносит инжектированный положительный заряд от цилиндрического электрода к плоскости. С внешней стороны струйка несет отрицательный заряд, проникающий из отрицательного слоя, окружающего верхнюю половину электрода. В центральной струйке положительных ионов, в процессе их движения от положительного электрода, происходит рекомбинация с отрицательными ионами гетерослоя, Гетерозаряженные слои формируются у обоих электродов. Положительный неравновесный приэлектродный слой у поверхности плоского электрода успевает сформироваться до того, как положительная струя успевает дойти до него. Центральная струйка достигает противоэлектрода в 0.3 с., после чего меняет направление движения на 90 градусов и продолжает распространяться вдоль плоского электрода, размывая положительный приэлектродный слой и снося часть положительных ионов из него конвективным потоком.

На рис. 5.13 и 5.14 приведены линейные распределения плотности объёмного заряда и(слева) и модуля скорости ЭГД-течения(справа) вдоль центральной струи. Из рис.5.13-14

видно, что из-за ненулевой собственной проводимости жидкости, а как следствие и существования рекомбинации, величина объёмного заряда в струе быстро падает, из-за чего участок действия Кулоновских сил - зона ускорения укорачивается, как и зона равномерного течения жидкости по сравнению с задачей с нулевой собственной проводимостью жидкости. Так же на увеличение зоны торможения влияет появление силы Кулоновского отталкивания между положительно заряженной струей и положительным приэлектродным слоем у плоского электрода. С увеличением собственной низковольтной проводимости рекомбинационный эффект возрастает и инжектированный с электрода заряд все труднее проникает в объем.

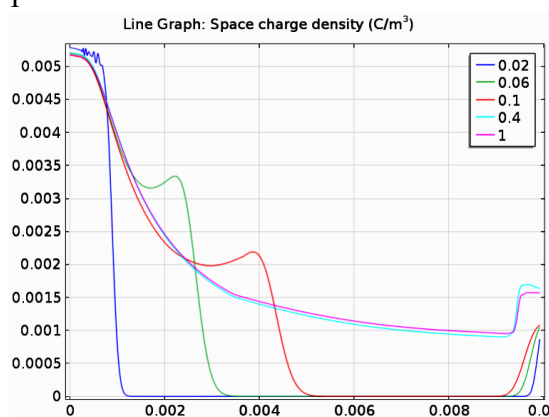


Рис.5.13 Распределения плотности заряда вдоль оси симметрии в различные моменты времени.

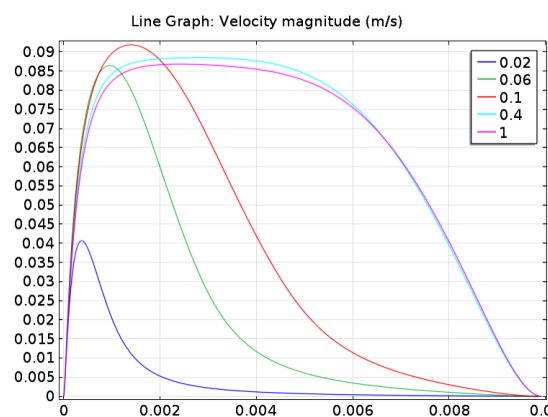


Рис.5.14 Распределения плотности заряда вдоль оси симметрии в различные моменты времени.

Структура центральной струи ЭГД-течений в широком диапазоне напряжений.

Для исследования структуры центральной струи ЭГД-течений в широком диапазоне напряжений использован метод динамических ВАХ. Исследования проведены в жидкостях №1, проводимостью 1 пСм/м и №2, проводимостью -1 нСм/м. Рассмотрим результаты моделирования ЭГД-течений методом динамических ДВАХ [5.13, 5.14]. Система электродов провод над плоскостью, инжекция происходит со всей поверхности проволоочного электрода. При моделировании напряжение медленно возрастало со скоростью 50 кВ/с. На рис.5.15 приведены распределения объёмного заряда и скоростей центральной струи ЭГД-течений при напряжениях 0,5, 1,5, 2, 2,5 и 15 кВ. В диапазоне малых напряжений: $U < 2\text{ кВ}$ безразмерный токовый параметр меньше единицы, поэтому у проволоочного и плоского электродов, также как и для плоских электродов, формируются неравновесные рекомбинационные слои объёмного заряда противоположного с электродом знака. У проволоочного электрода слой отрицательного заряда имеет кольцевую структуру, у плоского – плоскую. Напряженность электрического поля у проволоочного электрода выше, чем у плоского. Соответственно этому величина безразмерного параметра P_ξ у электродов различна. Характерная средняя толщина безразмерного приэлектродного слоя в межэлектродном промежутке, рассчитанная по формуле $1/P_\xi$ порядка 2, т.е. размеры неравновесного приэлектродного слоя по порядку соответствуют половине межэлектродного промежутка.

На графиках рис. 5.15 размеры неравновесных приэлектродных слоев зависят от напряжения и увеличиваются с ростом последнего. Их размеры несколько меньше половины МЭП, однако порядок тот же. Распределение напряженности электрического поля

неоднородно по поверхности проволочного электрода, причем максимум напряженности соответствует нижней части электрода. Поэтому благодаря наличию заряженного слоя у проволочного электрода наблюдаются слабые течения, направленные вдоль поверхности электрода снизу-вверх. Эти течения в некоторых работах называются течениями, обусловленными проводимостью. Более правильно их называть течениями, обусловленными неравновесными диссоационно-рекомбинационными слоями. У плоского электрода течений не наблюдается, а неравновесный слой сохраняет плоскую структуру, причем его толщина меньше, чем у проволочного. При напряжении 2 кВ безразмерная плотность тока инжекции K с нижней части проволочного электрода становится больше 1 ($K > 1$), при этом, как и следовало ожидать, структура неравновесного приэлектродного слоя существенно изменяется. Сквозь кольцевой слой гетерозаряда с нижней части проволочного электрода в объем жидкости проникает струйка жидкости, содержащая ионы, инжектируемые с поверхности электрода.

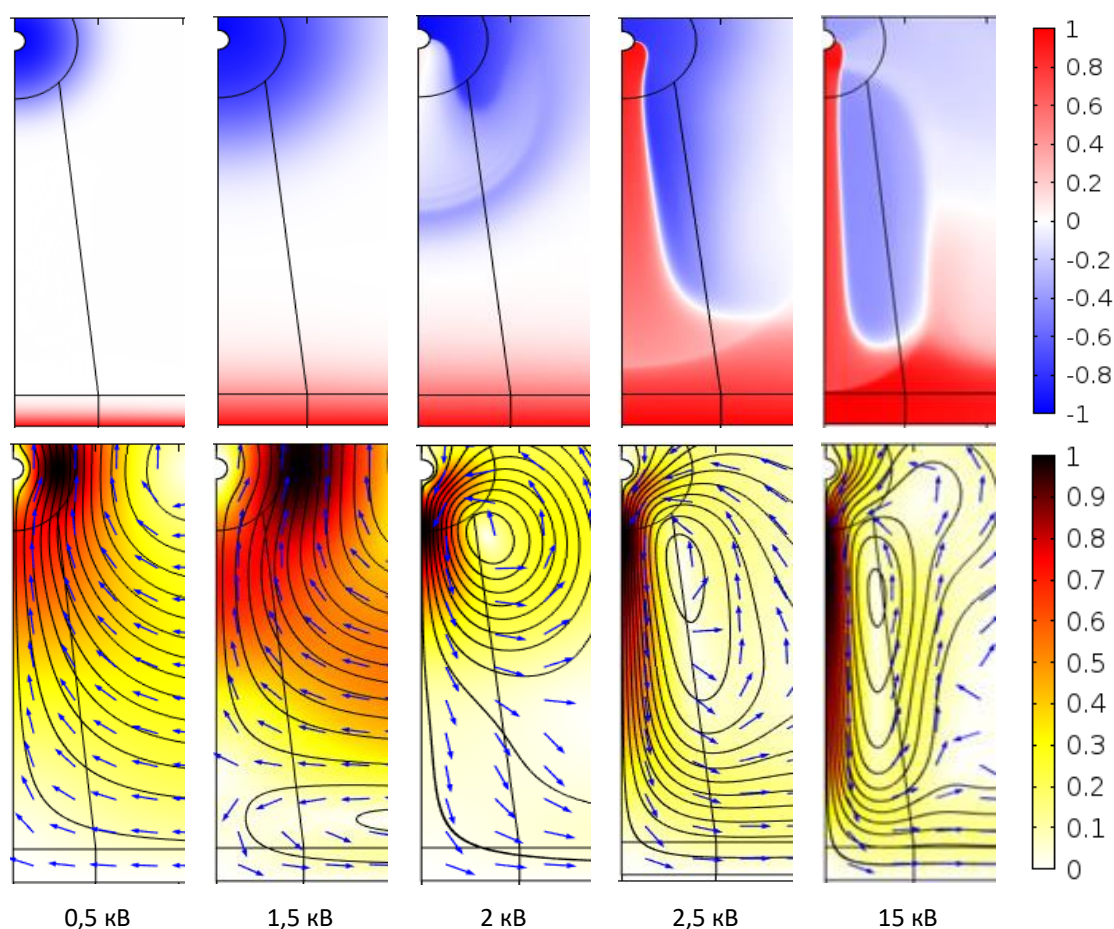


Рис. 5.15. Распределения объёмной плотности заряда (вверху) и векторные поля скорости и линии тока ЭГД-течений (внизу) для различных напряжений (жидкость №1).

Эта струйка заряжена одноименно с электродом. Плотность заряда, проникающего в жидкость очень мала, однако направление ЭГД-течений изменяется на обратное, а их интенсивность существенно возрастает по сравнению с течением при напряжении 1,5 кВ. Такое ЭГД-течение является инжекционным, а напряжение его возникновения обычно называют пороговым. Скорость инжекционного течения на начальном этапе (который обычно называется этапом неразвитого ЭГД-течения) очень быстро возрастает. У плоского электрода структура неравновесного слоя пока остается неизменной.

С ростом напряжения до 2,5 кВ величина плотности безразмерного тока инъекции быстро возрастает, поэтому возрастает плотность объемного заряда в струе, а заряженная струя пересекает межэлектродный промежуток и, упираясь в неравновесный приэлектродный слой у плоского электрода, нарушает его структуру. Судя по линиям тока, в жидкости реализуется замкнутое ячеистое ЭГД-течение. Поскольку скорость ЭГД-течения в десятки раз выше скорости движения ионов, то за время Максвелловской релаксации, характеризующее диссоциационно-рекомбинационные процессы, инжектированные ионы проникают вглубь жидкости, образуя центральную струйку. Этот процесс лучше виден на линейных продольных распределениях парциальных концентраций, приведенных на рис. 5.16.

Линейные распределения показывают, что распределения парциальных концентраций инжектированных ионов и концентрации ионов, формирующих объемный заряд, при различных напряжениях существенно отличаются друг от друга. Так при малых напряжениях до 2 кВ, когда безразмерный токовый параметр K близок к 1, у проволочного и плоского электродов имеются приэлектродные слои пониженной концентрации диссоциированных ионов, при этом инжектированные ионы проникают в жидкость не более чем до половины межэлектродного промежутка. При этом скорости аномальных встречных ЭГД-течений пока еще очень малы. Распределение суммарной концентрации ионов, формирующих объемный заряд, существенно отличается от распределения концентрации инжектированных ионов. При незначительном повышении напряжения до 2,5 кВ структура приэлектродных слоев существенно изменяется. Это связано с возникновением нормальных ЭГД-течений инжекционного типа и их влиянием на структуру приэлектродных слоев. Видно, что инжектируемые положительные ионы проникают в объем жидкости, достигая противоиэлектрода, приэлектродный слой дефицита положительных диссоциированных ионов преобразуется в струйку пониженной концентрации этих ионов, распространяющейся на весь МЭП. Распределение концентрации отрицательных ионов практически не изменяется: равновесное распределение по всему объему за исключением неравновесного приэлектродного слоя пониженной концентрации. Повышенная концентрация инжектированных ионов третьего сорта и дефицит положительных ионов 1 сорта сносится течением в объем жидкости, образуя зеркально симметричные распределения вдоль струй. В связи с этим распределения суммарной концентрации ионов, формирующих распределение плотности объемного заряда, существенно отличаются от распределения концентрации инжектированных ионов. Как видно из графиков, представленных на рис. 5.16, распределение объемного заряда в начальной части струйки линейно спадает в направлении течения, также, как и распределение плотности инжектированных ионов, однако у плоского электрода наблюдается их существенный рост. Этот рост определяется структурой неравновесного приэлектродного слоя отрицательных ионов.

По мере повышения напряжения безразмерный токовый параметр K быстро возрастает. Можно сказать, что при малых напряжениях инъекция слабая, а при напряжении 15-25 кВ - сильная. Как видно из рис. 5.16, по мере роста безразмерного параметра K (силы инъекции) влияние неравновесных приэлектродных слоев спадает. При этом структура центральной струйки инжектированных ионов становится все более однородной, а рекомбинационный эффект исчезает. Распределение плотности объемного заряда вдоль струйки при напряжении 17,5 кВ практически повторяет распределение концентрации инжектированных ионов.

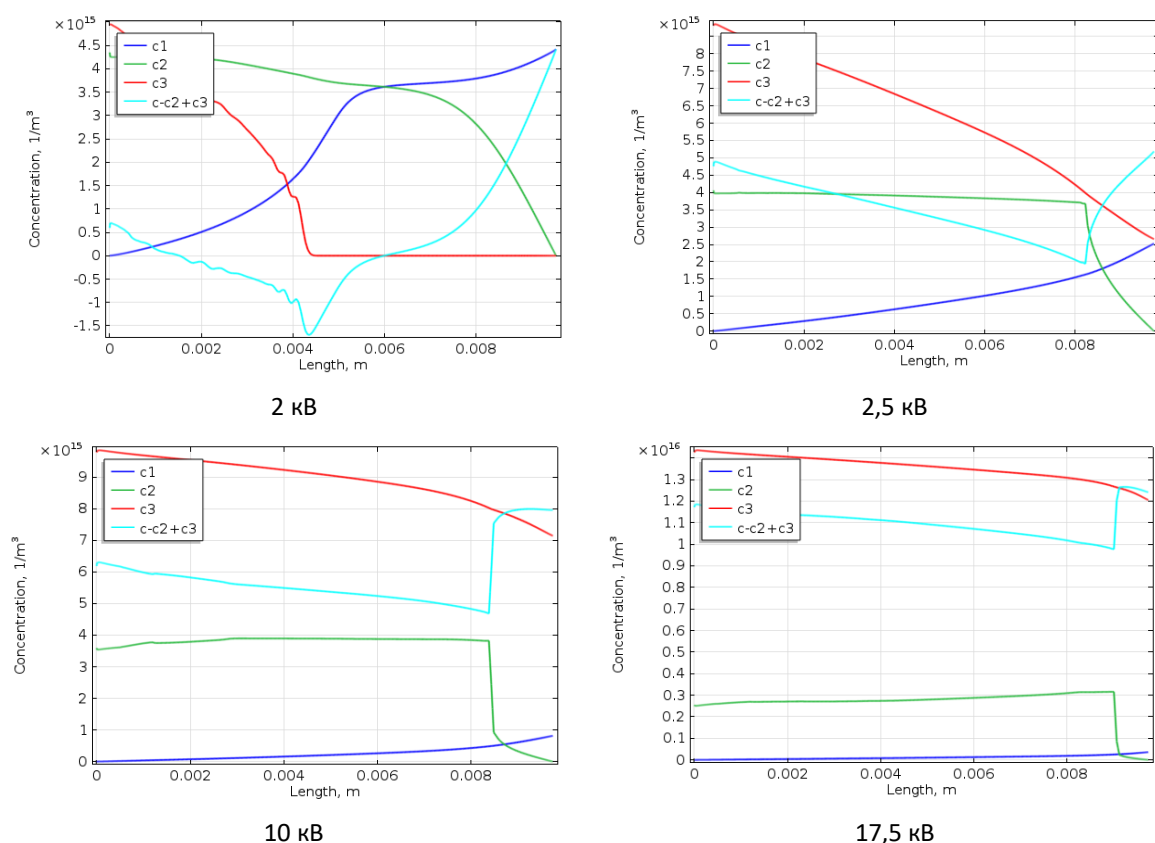


Рис. 5.16 Линейные распределения вдоль центральной струи концентраций диссоциированных положительных (c_1) и отрицательных (c_2) ионов и инжектированных (c_3) ионов в МЭП при различных напряжениях.

Рассмотрим результаты моделирования в жидкости №2 с более высокой низковольтной проводимостью, равной 1 нСм/м. На рис. 5.17а приведены распределения плотности объемного заряда в межэлектродном промежутке при напряжениях 1,5, 2, 3, 6, 10 кВ, а на серии рис. 5.17б распределения модуля скорости и линии тока ЭГД-течений. В этой жидкости безразмерный токовый параметр K становится равным 1 при плотности тока инжекции на два порядка выше, чем в жидкости №1, поскольку плотность тока проводимости в ней на два порядка выше. При более слабой инжекции инжектируемые ионы рекомбинируют в пределах тонкого приэлектродного неравновесного слоя, не проникая в объем жидкости. В таких условиях при напряжении 1,5 кВ у проволочного электрода формируется неравновесный слой гетерозаряда и реализуется слабое anomальное ЭГД-течение, направленное на проволочный электрод, практически не влияющее на структуру неравновесного приэлектродного слоя, имеющего кольцевую структуру. Из рис. 16 видно, что при пороговом напряжении 2 кВ безразмерный параметр $P_\xi=100$, т.е. толщина приэлектродных слоев, рассчитанная в плоском приближении, на два порядка ниже, чем в жидкости №1. В нормальном масштабе этот слой слабо различим. Поэтому на втором, третьем, четвертом и пятом графиках показана увеличенная часть межэлектродного промежутка, позволяющая различить приэлектродный слой и тонкую струйку

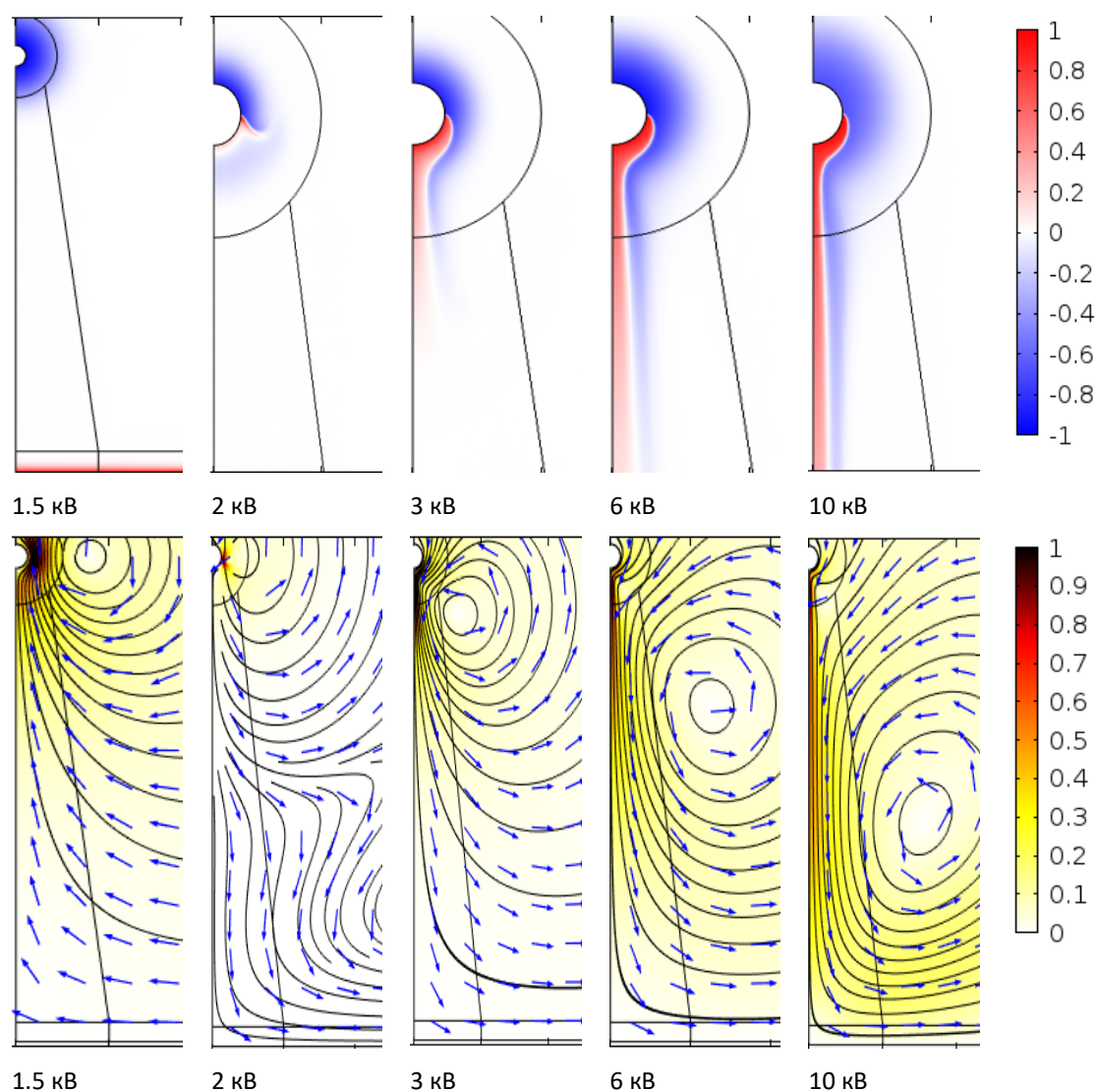


Рис. 5.17 Распределение плотности объёмного заряда (вверху) и векторные поля скорости и линии тока центральной струи ЭГД-течений (внизу) при различных напряжениях (жидкость проводимостью σ).

инжектированных ионов, проникающую от проволочного электрода в объем жидкости. При отсутствии инъекции (1,5 кВ), также, как и в предыдущем случае у электродов формируются неравновесные диссоциационно-рекомбинационные слои, заряженные противоположно электроду. У проволочного электрода слои имеют кольцевую структуру, у плоского электрода – плоскую. Поперечные размеры приэлектродных слоев значительно меньше, чем для жидкости №1. Слабые ЭГД-течения, обусловленные неравновесным слоем, имеют очень малую скорость и аномальное встречное направление и не влияют на структуру приэлектродных слоев. При напряжении 2 кВ ($K=1$) структура кольцевого приэлектродного слоя существенно изменяется: возникает нормальное ЭГД-течение, направленное от нижней половины проволочного электрода к плоскому. Это течение сносит инжектированные ионы с нижней части проволочного электрода в жидкость, формируя очень тонкую струйку инжектированных положительных ионов, быстро рекомбинирующих с отрицательными ионами жидкости. При напряжении 3 кВ под проволочным электродом формируется очень тонкая струйка жидкости, заряженная одноименно с электродом. При напряжении 10 кВ длина центральной струйки равна длине МЭП, а ее толщина заметно меньше, чем в жидкости №1. ЭГД-течение переходит в развитый режим и приобретает выраженный двух ячеистый характер (рис. 5.17б).

На рис. 5.18 приведены линейные распределения парциальных концентраций ионов 1, 2, и 3 сортов, а также плотности объемного заряда для напряжений 2, 3, 10 и 20 кВ. При напряжениях 2 кВ и ниже у обоих электродов наблюдаются тонкие (менее 1 мм) неравновесные слои: недостатка положительных ионов сорта 1 у проволочного электрода, и отрицательных сорта 2 у плоского электрода. Инжектированные ионы сорта 3 проникают в межэлектродный промежуток не далее глубины неравновесных приэлектродных слоев, рекомбинируя с отрицательными ионами жидкости и лишь незначительно понижая их концентрацию. Объемный заряд сосредоточен в пределах неравновесных слоев и имеет гетерозарядный характер. При напряжении 3 кВ структура неравновесного слоя у плоского электрода сохраняется, а у проволочного электрода изменяется. Как и ранее из приэлектродного слоя формируется короткая заряженная струйка ЭГД-течения инжекционно-го типа, которая сносит инжектированные ионы № 3 в объем жидкости. Эта же струйка сносит в объем жидкости также и недостаток диссоциированных ионов сорта 1.

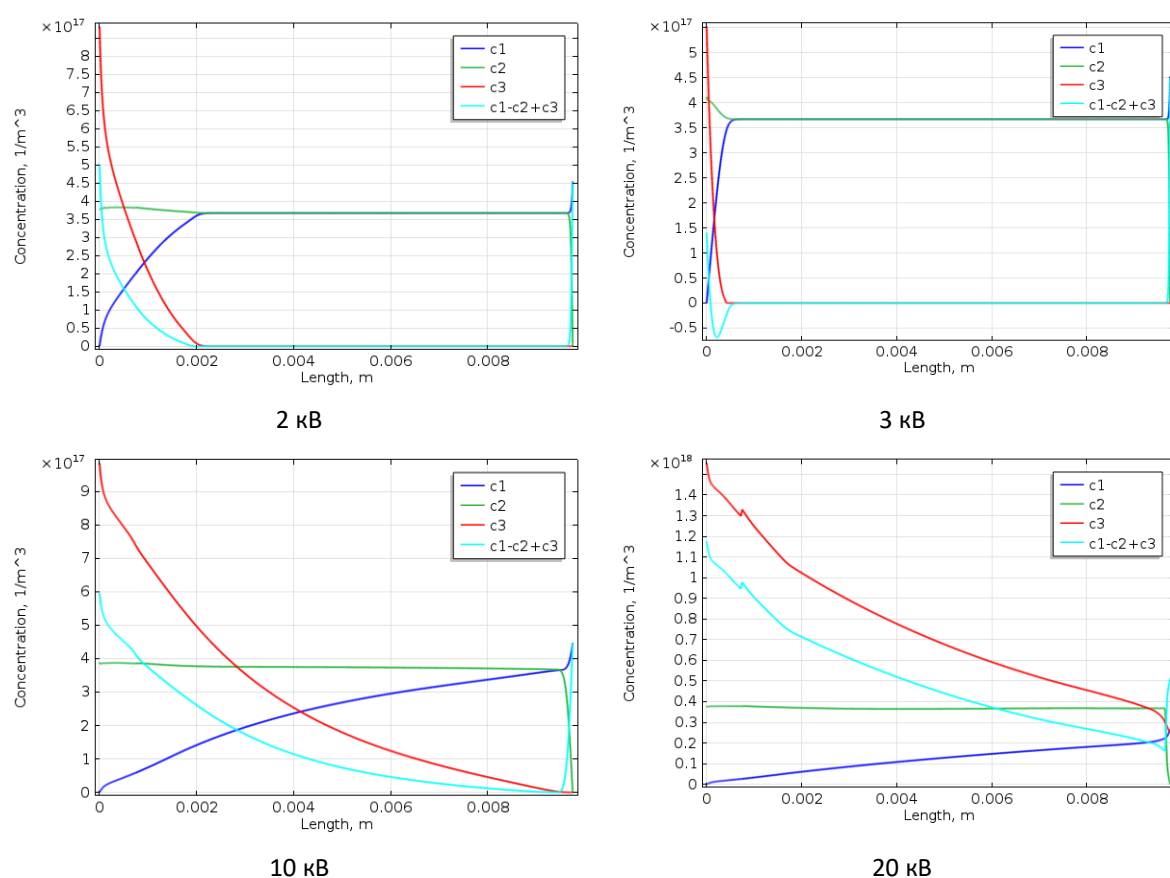


Рис. 5.18. Линейные распределения концентраций положительных (c_1) и отрицательных (c_2) диссоциированных и инжектированных положительных (c_3) ионов в МЭП при различных напряжениях.

За существенно уменьшенное время Максвелловской релаксации, составляющее для жидкости №2 - 0,01с происходит ускоренная рекомбинация инжектированных ионов 3 с отрицательными ионами 2, а также восстановление равновесной концентрации ионов 1 за счет диссоциации. Поэтому глубина проникновения струйки инжектированных ионов при напряжении 3 кВ невелика и возрастает до длины межэлектродного промежутка только при более высоком напряжении, чем в менее проводящей жидкости №1, а именно при 10 кВ. В связи с этим значительно увеличен интервал напряжений перехода от режима неразвитого к режиму развитого ЭГД-течения. При дальнейшем увеличении напряжения структура центральной струи развитого ЭГД-течения не изменяется, увеличивается только интенсивность инжекции, т.е. величина безразмерного токового параметра K и плотность

заряда в струе. По мере перехода в режим сильной инжекции при напряжении 10-20 кВ рекомбинационный эффект уменьшается, а распределение концентрации инжектированных ионов все менее отличается от распределения концентрации инжектируемых ионов 3, формирующих объемный заряд.

В жидкости пониженной проводимости - №1 наблюдается описанная в главе 4 выше типовая зонная структура центральной струи ЭГД-течения: короткая зона ускорения, промежуточная зона слабо изменяющегося течения и зона торможения у плоского электрода. В жидкости повышенной проводимости абсолютные скорости повышены в несколько раз, однако это повышение не пропорционально повышению плотности тока инжекции (который увеличен на два порядка). Зонная структура течения также иная: зона ускорения значительно короче, чем в жидкости 1, далее зона слабо изменяющегося течения и зона торможения у противоэлектрода. Этот вид продольного распределения скорости обусловлен рекомбинационным эффектом инжектируемого заряда вдоль центральной струи течения. Объемный заряд, инжектированный в жидкость, значительно быстрее рекомбинирует при его движении по межэлектродному промежутку, не доходя до противоэлектрода (рис. 5.18). Поэтому заряженная струйка доходит до противоэлектрода, т.е. течение переходит в развитой режим, только при относительно высоких напряжениях: более 10 кВ. При дальнейшем повышении равновесной проводимости рекомбинационный эффект усиливается и в жидкостях с равновесной проводимостью 100 нСм/м максимальная длина центральной струйки ЭГД-течения значительно меньше длины межэлектродного промежутка. При этом, несмотря на увеличение тока инжекции пропорциональное проводимости, средняя скорость течения в центральной струе существенно меньше, чем в жидкости №2. Поэтому в целом ЭГД-течения инжекционного типа эффективны только в диапазоне равновесных проводимостей до 1 нСм/м, а зависимость интенсивности ЭГД-течений от равновесной проводимости имеет экстремум (см. главу 4).

Таким образом в несимметричной системе электродов типа игла (провод) над плоскостью в диэлектрической жидкости с конечной собственной равновесной проводимостью в диапазоне низких напряжений до $U_{\text{пор}}$ у каждого электрода формируются неравновесные слои, в пределах которого полностью гибнут инжектированные ионы. При этом в жидкости реализуются слабые аномальные встречные течения, обусловленные градиентом давления по поверхности проволочного электрода. При напряжении выше $U_{\text{пор}}$ в приэлектродном слое у проволочного электрода инжектированные ионы гибнут лишь частично, а остальная часть инжектированных ионов образует слой гомозаряда из которого формируется тонкая струйка инжектированных ионов, вызывающая развитие нормального ЭГД-течений инжекционного типа, направленного от электрода. С увеличением напряжения реализуются два режима ЭГД-течений: режим слабой инжекции при K порядка 1 и режим сильной инжекции при $K \gg 1$. В режиме слабой инжекции рекомбинация инжектированных ионов с противоионами собственной проводимости существенно влияет на свойства центральной струи ЭГД-течения и течения носят неразвитый характер, т.е. заряженная струйка не достигает противоэлектрода, а инжектированный заряд полностью рекомбинирует внутри межэлектродного промежутка. С увеличением напряжения параметр K растет и реализуется режим сильной инжекции. В режиме сильной инжекции рекомбинационный эффект менее существенен, т.к. концентрация инжектированных ионов существенно выше концентрации противоионов проводимости.

С увеличением собственной проводимости жидкости инжектируемый заряд более интенсивно рекомбинирует в неравновесном приэлектродном слое, поэтому для выполнения условия $K > 1$ необходимо пропорционально увеличить плотность тока инжекции. С увеличением равновесной проводимости время Максвелловской релаксации $\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\sigma_0}$ и толщина приэлектродного неравновесного слоя падают. Поэтому в жидкости с повышенной проводимостью 1 нСм/м приэлектродные слои значительно меньше межэлектродного расстояния и тоньше заряженные струйки развитого ЭГД-течения.

Существенный рекомбинационный эффект приводит к увеличению диапазона напряжений, при котором ЭГД-течение переходит в развитый режим, а также к уменьшению глубины проникновения заряженной струйки в межэлектродный промежуток. В области проводимостей выше 10 нСм/м ЭГД-течения инжекционного типа практически не возникают, т.к. увеличение плотности инжекционного тока ограничено и инжектированный заряд, рекомбинирует в пределах тонких приэлектродных слоев, не проникая в объём жидкости. В этих условиях, ЭГД-течения по-видимому обусловлены эффектом Вина [5.15-5.16].

Компьютерное моделирование позволило впервые описать процесс формирования и зарядовую структуру центральной струи ЭГД-течений в несимметричных системах электродов, когда инжекция идет на электроде с малым радиусом кривизны. Изучены структурные особенности центральной струи в режимах неразвитого и развитого течения, влияние низковольтной проводимости и интенсивности инжекции на зарядовую структуру центральной струи. Проведен анализ зонной структуры центральной струи ЭГД-течения с позиции силовых воздействий и энергетических преобразований.

Приведем результаты сопоставления результатов моделирования и экспериментального исследования поля скоростей центральной струи ЭГД-течений в системе игла-плоскость. На рис. 5.19 представлены контурные графики

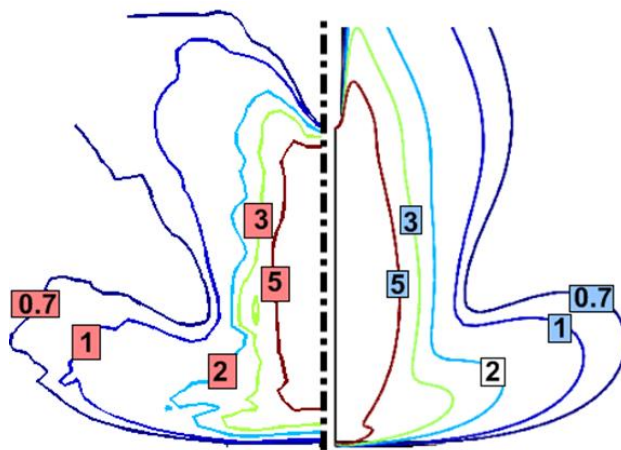


Рис. 5.19. Контурные графики скорости при напряжении 12 кВ: левая половина — экспериментальные данные, полученные PTV-методом, правая — данные моделирования; значения скорости указаны в см/с.

скорости, полученные в эксперименте (слева) и в моделировании (справа). В целом, учитывая сложности и погрешности экспериментального определения поля скоростей, они имеют весьма близкий вид. Хорошее совпадение наблюдается для внешних контуров, где в эксперименте располагалось много траекторий визуализирующих частиц, и где соответствующие данные, по этой причине, имеют более высокую достоверность. Наибольшее расхождение (из-за отсутствия траекторий визуализирующих частиц в центральной части)

наблюдается для центральных контуров — в моделировании эти контуры более вытянуты в направлении движения струи. Столь плотное расположение линий равного уровня скорости свидетельствует о высоких ускорениях жидкости в этих областях, что достаточно трудно выявить в экспериментальном исследовании. В целом зонная структура центральной струи, полученная в эксперименте и моделировании, близко соответствуют друг другу.

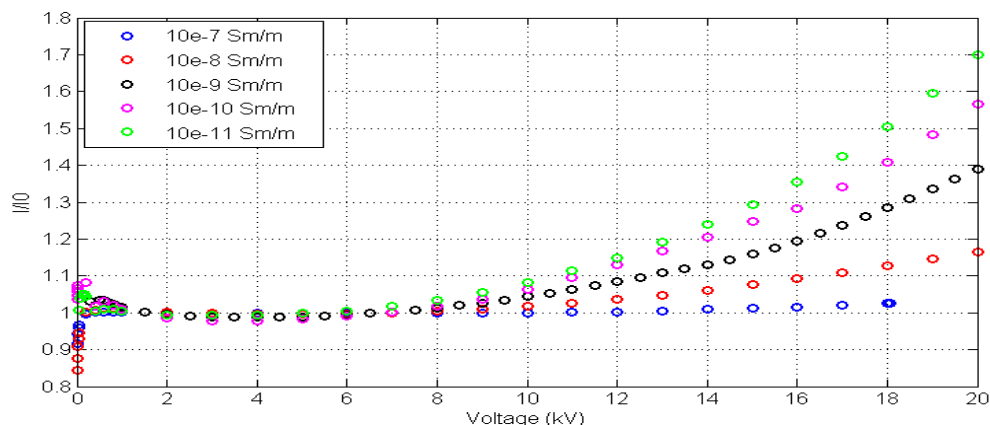


Рис. 5.20. Приведённые вольт-амперные характеристики для исследованных проводимостей.

На рис. 5.20 представлены приведенные ВАХ полученные по результатам моделирования для жидкостей различных проводимостей в системе электродов провод над плоскостью. Они соответствуют аналогичным ВАХ полученным в экспериментах (см. рис. 4.25). Степень отклонения от уровня низковольтной проводимости на высоковольтном участке падает с ростом проводимости.

Литература к главе 5.

- 5.1 Стишков Ю.К. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ. мат. наук ЛГУ, Ленинград, 1971г, 174с.
- 5.2 Ситников А.А., Стишков Ю.К. Моделирование ЭГД-течения инжекционного типа в трех ионной постановке // Сборник докладов 17-ой Международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, Плес (Россия), сентябрь 6 - 9, 2016., 2016. – С. 248 – 256
- 5.3 Sitnikov, A.A., Stishkov, Y.K. Three-ion model of EHD flows in the “wire-over-plane” electrode system // Fluid Dynamics, 2017. – Vol. 52, – № 2. – P. 171 – 177
- 5.4 Лазарев А.С., Стишков Ю.К. // Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». – Санкт-Петербург, 2006. – С. 60–65.
- 5.5 Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков / И. Адамчевский. – Л. : Энергия, 1972. – 296 с.
- 5.6 Елагин И.А., Стишков Ю.К. Особенности формирования центральной струи эгд-течения в системе электродов провод-плоскость // Сборник трудов IX Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2009. – С. 164-168
- 5.7 Стишков Ю.К., Богданов Д.В. Влияние неравновесных приэлектродных слоев на структуру ЭГД течений в трех ионной модели диэлектрической жидкости // ЖУРНАЛ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ, 2017. – Т. 87, – № 8. – С. 1144–1150

- 5.8 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Особенности зонной структуры ЭГД-течений в системе игла над плоскостью // Сборник докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей» – г. Санкт-Петербург, – 2006. – С. 175–179
- 5.9 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Компьютерное моделирование ЭГД-течений в системе электродов игла-плоскость / // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – № 11. – С. 17–23.
- 5.10 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Ампер-секундные характеристики переходного процесса установления ЭГД-течений при разных механизмах зарядообразования // Сборник докладов X-ой Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2012. – С. 82-85.
- 5.11 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Особенности конвективного механизма высоковольтной проводимости в системе игла-плоскость // Сборник докладов IX Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей» – г. Санкт-Петербург, – 2009. – С. 71–76.
- 5.12 Стишков Ю.К., Богданов Д.В. Компьютерное моделирование инжекционного механизма возникновения ЭГД-течений в жидкостях с повышенным уровнем низковольтной проводимости. // Электронная обработка материалов, 2017. – Т. 53, – № 1. – С. 16-22
- 5.13 Стишков Ю.К., Чирков В.А., Ситников А.А. Динамические вольтамперные характеристики слабопроводящих жидкостей в сильно неоднородных электрических полях // Сборник докладов X-ой Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2012. – С. 164-167.
- 5.14 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Моделирование динамической вольтамперной характеристики в симметричной системе электродов в канале с низкопроводящей жидкостью // Сборник докладов X-ой Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2012. – С. 3-7
- 5.15 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Две модели электрогидродинамических течений в сильнонеоднородных электрических полях // Материалы Десятой Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики» – г. Евпатория (Украина), – 2010. – С. 159–160
- 5.16 Стишков Ю. К. Чирков В.А. Формирование электрогидродинамических течений в сильнонеоднородных электрических полях при двух механизмах зарядообразования // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – № 1. – С. 3–13.

ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭГД-ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ

ЭГД-течения в каналах имеют особо важное значение поскольку они находят практическое применение. Подробно ЭГД-устройства описаны в главе 8, а здесь мы сосредоточимся на исследовании структуры этих течений. Этому вопросу посвящено большое количество работ [6.1-6.6]. среди них имеются экспериментальные исследования [6.1-6.2], подробно описанные в главе 4 и работы в которых изложены результаты компьютерного моделирования. В ранних работах использовались оригинальные методы и упрощенные модели [6.3-6.6]. Однако наиболее значимые результаты получены в более поздних исследованиях, проведенных в программном комплексе Comsol Multiphysics. Эти исследования будут рассмотрены далее, а вначале, также как в главе 5, рассмотрим структуру силовых течений в каналах.

Течения в каналах(трубах) под действием объемных сил.

В предыдущей главе были рассмотрены особенности структуры ЭГД-течений в закрытых объемах. Однако для практического использования наибольший интерес представляют ЭГД-течения в каналах или трубах. Рассмотрим простейший случай силового течения в плоском канале, образованном двумя плоскими стенками, в случае, когда расстояние между стенками гораздо меньше продольных размеров канала. В этом случае задачу можно рассматривать в двумерном приближении. В задачах классической гидродинамики течения в трубах обычно протекает за счет перепада давления на концах трубы. В ЭГД задачах, а также в ряде других задач, течение возникает за счет действия объемной силы, на некоторую ограниченную область жидкости, расположенную внутри канала. В стационарном случае подобная упрощенная задача описывается системой уравнений гидродинамики [6.7]: уравнением Навье–Стокса (6.1) с внешней объемной силой \vec{f} и уравнением неразрывности (6.2):

$$\rho(\vec{v}, \nabla)\vec{v} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} + \vec{f} \quad (6.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (6.2)$$

Параметры: $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}$ соответствуют параметрам трансформаторного масла. Будем считать объемную силу однородной, направленной вдоль центральной плоскости канала, слева направо и равной 800 Н/м^3 (см. рис. 6.1). Длина области действия силы равна 1 см, толщина – 1мм. Эти значения близко соответствуют распределению сил в сквозном ЭГД течении. В различных задачах варьировалась длина канала в диапазоне от 2 до 100 см.

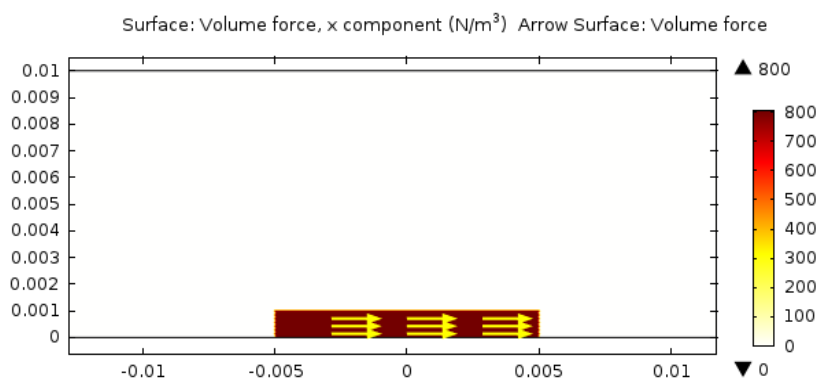


Рис. 6.1. Область действия внешней силы.

Интересно рассмотреть замкнутый канал. Однако замкнутые каналы имеют более сложную форму, например, цилиндрическую. Для создания замкнутого канала в плоской геометрии применим следующее граничное условие на торцевые границы канала. Это оригинальные граничные условия, которые переносят значения искомых функций с правой границы на левую, таким образом создается замкнутый цикл. Задача решалась для различных длин трубы и для различных значений внешней объемной силы.

Для начала рассмотрим результаты решения для длины трубы 10 см. То есть отношение длины трубы к длине области силового воздействия составляет 1:9. На рис.6.2 приведено векторное поле скоростей, на фоне поверхностного распределения модуля скорости на среднем участке канала длиной 4,5 см. Область действия объемной силы соответствует участку: $-5 \div 5$ мм.

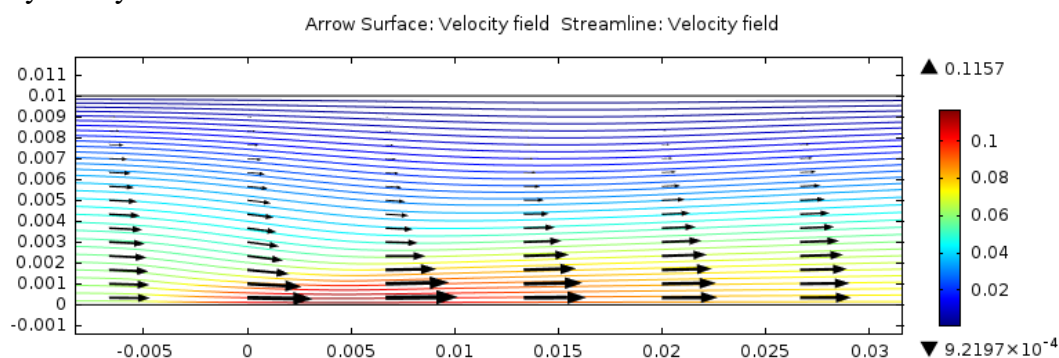


Рис.6.2. Распределение модуля скорости, векторный график и линии тока.

По характеру линий тока видно, что на начальном участке канала линии тока взаимно параллельны, на этом участке наблюдается диссипативное течение с характерным Пуазейлевским профилем. Далее линии тока сужаются к плоскости симметрии течения на участке от $-0,5$ см до $0,5$ см, что соответствует силовой части течения, а затем они вновь расширяются и становятся вновь взаимно параллельными при переходе к диссипативной внешней части. Во внешней области профиль скорости носит Пуазейлевский характер, а в середине внутренней силовой области на участке $-5 - 30$ мм профиль скорости имеет существенные отличия (см. рис. 6.3).

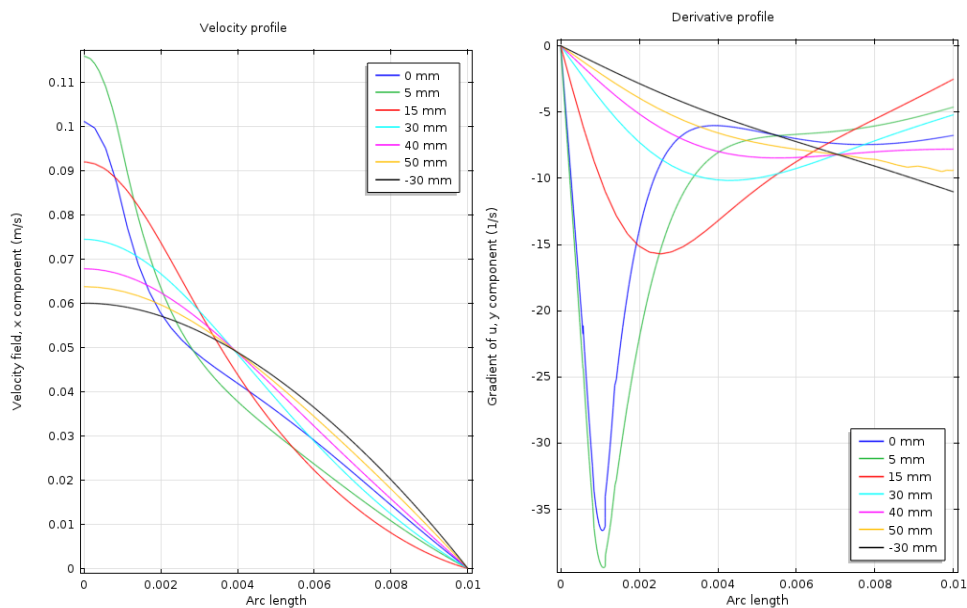


Рис. 6.3. Профили и производная профиля скорости на разных расстояниях вдоль канала.

Средний участок течения состоит из участка силового течения $-5 \div 5$ мм, и двух переходных участков, короткого до и длинного – после силового. Наиболее отчетливо эти различия видны на графиках производной профиля. Производная профиля скорости на силовом участке течения (см. рис. 6.3) имеет характерный минимум, соответствующий боковой границе полосы действия объемных сил. На переходном участке производная профиля течения плавно изменяется до линейного. На остальной части трубы течение имеет чисто диссипативный характер и не отличается от классического течения в канале. Назовем эту часть канала – внешней, а остальную – внутренней. Оценим безразмерные параметры характеризующие данную задачу: определим характерную длину L_1 в числе Рейнольдса (6.3) через поперечный размер канала 2 см, а в числе Фруда (6.4) характерный размер равен длине полосы действия силы L_2

1. Отношение силы инерции к вязкому члену (число Рейнольдса):

$$Re = \frac{\rho v L_1}{\eta} = \frac{800 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{10^{-2}} \approx 0.88 \quad (6.3)$$

2. Отношение силы инерции и внешней силы (число Фруда):

$$Fr = \frac{\rho v^2}{L_2 f} \approx 1.2 \quad (6.4)$$

Рассмотрим распределение давления и направление сил градиента давления $-\nabla p$ во внутренней и внешней области течения. На рис. 6.4 показано векторное поле градиента давлений и поверхностное распределения давления во внутренней и внешней области течения (длина стрелочек соответствует логарифму силы).

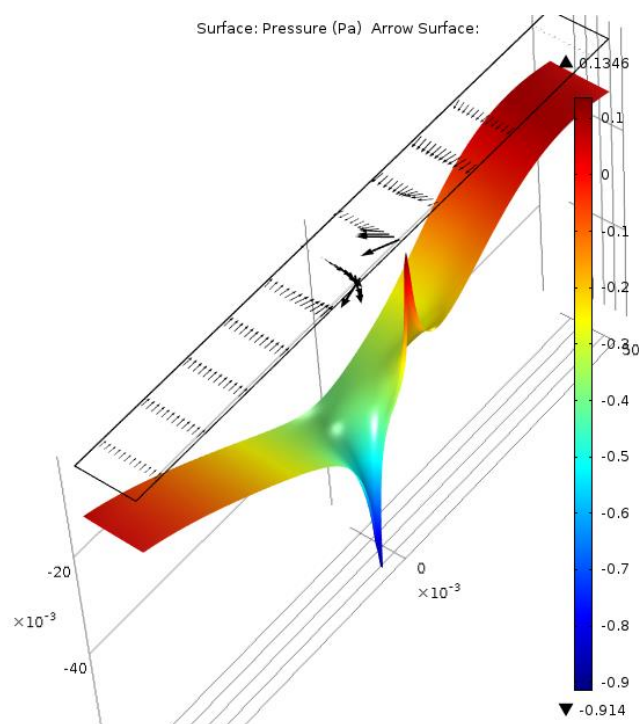


Рис. 6.4. Распределение давления и векторный график гидростатической силы.

Видим, что сила гидростатического давления действует как вдоль всего канала, так и в силовой части течения. Во внешней области, профиль сил давления однороден поперек канала, во внутренней области и на переходных участках картина иная: на границах силовой полосы наблюдаются резкие всплески градиента давления, причем в начальной части силовой полосы силы давления ускоряют жидкость, а в конечной части тормозят. В переходной области силы градиента давления способствуют переходу от силового течения к диссипативному.

Компьютерное моделирование ЭГД-течений в симметричной системе электродов [6.8-6.15].

Настоящий раздел посвящен компьютерному моделированию ЭГД-течений инжекционного типа в длинном замкнутом канале, выполненном в программном комплексе Comsol. Наиболее полные результаты получены в рамках четырех ионной модели слабо проводящей жидкости, в которой два противоположно заряженных иона образованы за счет инъекции с электродов и еще два за счет диссоциации примесей. Исследованы встречно-симметричные и сквозное ЭГД-течение, образованное системой электродов в виде двух длинных взаимно параллельных проводов одинакового диаметра, размещенных в замкнутом щелевом канале, на которые подается высокое напряжение.

Рассмотрена симметричная система электродов провод-провод в щелевом канале, образованном плоскими пластинами из непроводящего диэлектрического материала (Рис.6.5). Поскольку модель симметрична относительно горизонтальной плоскости, проходящей через электроды, рассчитывалась только половина модели. Длина щелевого канала: значительно больше его ширины, поэтому рассматривалось двумерное приближение. Геометрические размеры канала следующие: $W = 6 \text{ cm}$, $H = 0.75 \text{ cm}$, $L = 1 \text{ cm}$, $d = 0.1 \text{ cm}$, $r = 0.025 \text{ cm}$ – радиус электродов.

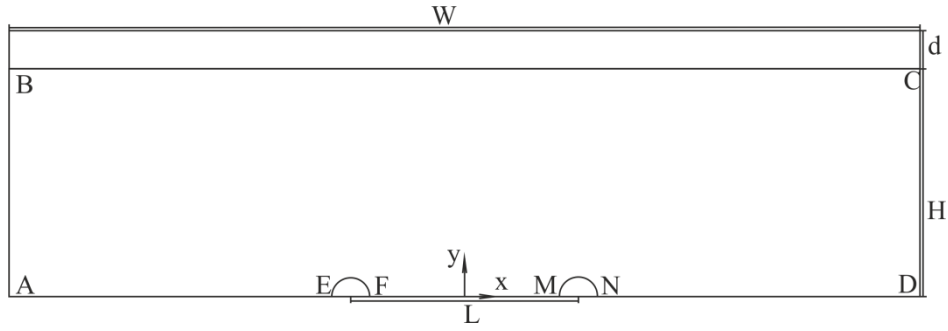


Рис. 6.5 Геометрия модели.

В реальных условиях замкнутый канал имеет кольцевую форму. Однако для упрощения расчетов замкнутость канала осуществлялась при помощи оригинального граничного условия, позволяющего переносить значения искомых функций с правой границы канала на левую. Поскольку геометрия и размеры электродов идентичны, то следует ожидать инъекции на обоих электродах. Поэтому в модели следует рассматривать четыре иона: два, образованных за счет диссоциации и два, образованных за счет инъекции с электродов. В некоторых задачах для упрощения расчетов, использованы одно и двух ионные модели, что оговаривается отдельно. Левый электрод положительный, правый отрицательный.

Рассматривается полная система ЭГД-уравнений, которая включает в себя уравнение Навье-Стокса (6.5), уравнение неразрывности (6.6), уравнения электростатики (6.7) и (6.8), уравнения Нернста-Планка (6.9-12) – два для инжектированных ионов, два для диссоциированных ионов:

$$\gamma \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \gamma(\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} - \rho \nabla \varphi \quad (6.5)$$

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (6.6)$$

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} \quad (6.7)$$

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} + \text{div}(n_1(z_1 b_1) \vec{E} - D_1 \nabla n_1 + n_1 \vec{v}) = g_1 \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} + \text{div}(n_2(z_2 b_2) \vec{E} - D_2 \nabla n_2 + n_2 \vec{v}) = g_2 \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial n_3}{\partial t} + \text{div}(n_3(z_3 b_3) \vec{E} - D_3 \nabla n_3 + n_3 \vec{v}) = g_3 \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial n_4}{\partial t} + \text{div}(n_4(z_4 b_4) \vec{E} - D_4 \nabla n_4 + n_4 \vec{v}) = g_4 \quad (6.12)$$

$$\rho = \sum_i z_i e n_i \quad (6.13)$$

Где E – напряжённость электрического поля, ρ – объёмная плотность заряда, φ – электрический потенциал, n_1 – концентрация положительных инжектированных ионов, n_2 – концентрация отрицательных инжектированных ионов, n_3 – концентрация положительных диссоциированных ионов, n_4 – концентрация отрицательных диссоциированных ионов, g_i

– функции источника, ε – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости, b_i – подвижность ионов, D_i – коэффициент диффузии ионов, z_i – валентности ионов; ε_0 – диэлектрическая постоянная, e – элементарный электрический заряд, t – время; индекс i указывает на сорт ионов, γ – плотность жидкости, v – скорость течения, p – давление, η – вязкость. В общем случае свойства ионов могут отличаться, однако в данной задаче свойства различных сортов ионов считались одинаковыми. Кроме того, рассматривается случай, когда все ионы одновалентны, то есть $|z_i| = 1$.

В данной задаче рассматриваются инжекционный и диссоционный механизмы зарядообразования с учетом рекомбинации. Инжектированные ионы рекомбинируют между собой и с диссоциированными ионами противоположного знака. Диссоциированные ионы рождаются в объеме и рекомбинируют между собой и с инжектированными ионами. В правой части уравнений (5) – (8) появляется слагаемое, описывающее рекомбинацию частиц в объеме, а в (7) – (8) добавляется слагаемое, описывающее объемный источник рождения ионов W :

$$g_1 = -a_r n_1 (n_2 + n_4) \quad (6.14)$$

$$g_2 = -a_r n_2 (n_1 + n_3) \quad (6.15)$$

$$g_3 = W - a_r n_3 (n_2 + n_4) \quad (6.16)$$

$$g_4 = -a_r n_4 (n_1 + n_3) \quad (6.17)$$

где W – интенсивность диссоциации, a_r – коэффициент рекомбинации. Коэффициент рекомбинации i -го и k -го сорта частиц определяется по формуле Ланжевена $\alpha_{rik} = e(b_i + b_k)/(\varepsilon\varepsilon_0)$.

В жидкости, обладающей собственной проводимостью, при отсутствии внешнего электрического поля образование ионов происходит за счет теплового движения молекул. Равновесная концентрация ионов, которые образуются за счет теплового движения молекул (диссоциации), определяется условием равенства скорости диссоциации и рекомбинации и в отсутствии инжекции зависит от низковольтной проводимости: $n_0 = \sigma_0/(2eb)$. Равновесная концентрация ионов в данной задаче задается в качестве начального равновесного значения концентрации диссоциированных ионов.

В данной задаче интенсивность диссоциации для положительных и отрицательных частиц одинакова. Интенсивность диссоциации при отсутствии внешнего электрического поля определяется через равновесную концентрацию и записывается следующим образом: $W_0 = \sigma_0^2/(2eb\varepsilon\varepsilon_0)$. Эффект Вина в данной задаче не учитывается, то есть считается, что в изотермическом случае интенсивность диссоциации постоянна по объему и равна интенсивности диссоциации в отсутствии электрического поля $W = W_0$. Таким образом, функции источника ионов в уравнении (6.16 и 6.17) можно записать следующим образом:

$$g_3 = W_0 - a_r n_3 (n_2 + n_4) \quad (6.18)$$

$$g_4 = W_0 - a_r n_4 (n_1 + n_3) \quad (6.19)$$

Коэффициент диффузии определяется соотношением Эйнштейна $D_i = k_B T_0 b_i / e$. Где k_B – постоянная Больцмана, T_0 – температура в системе. Свойства жидкости соответствует свойствам очищенного трансформаторного масла: $|z_i| = 1$, $\gamma = 950 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 4.75 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Для уравнения Пуассона на границах электродов EF и MN задавалась разность потенциалов (напряжение), которое либо включается, либо сначала линейно возрастает до 30 кВ со скоростью 100 В/с, а затем уменьшается до нуля. На диэлектрической стенке BC задается условие равенства нулю нормальной компоненты напряженности электрического поля $N \cdot D = 0$. В этом случае считается, что заряд на стенках экранирует поле и нормальная компонента поля равна нулю. В некоторых задачах условие на стенке более сложное.

Плотность тока для инжектированных ионов одноименного с электродом знака на поверхности электродов EF и MN задавалась в виде: $j_i = f_i(E)$. Гибель ионов противоположного знака, задавалась в виде равенства плотности тока ионов, приходящего на электрод из объема, плотности тока на поверхности электрода: $j_i \cdot N = -(n_i(z_i b_i)E - D_i \nabla n_i + n_i v) \cdot N$. На границе EF задавалась гибель отрицательных ионов, на границе MN – положительных ионов. На границе канала АВ задавались плотности токов каждого сорта ионов, равные соответствующим плотностям токов на правой границе CD, которые определялись следующим равенством $-j_i \cdot N = (n_i(z_i b_i)E - D_i \nabla n_i + n_i v) \cdot N$. На верхней границе BC и нижней границах AE, FM и ND задавалось условие не проникновения ионов (условие изоляции) $-j_i \cdot N = 0$. Ток инжекции на электродах задаются в виде квадратичного полинома от локальной напряженности электрического поля по формуле:

$$j = (A \cdot |E| + B \cdot |E|^2) \cdot N \quad (6.20)$$

Где А и В зависят от материала рассматриваемых электродов и примесных добавок к жидкости. Коэффициенты А и В подбирались таким образом, чтобы для моделирования встречных ЭГД-течений плотности токов на обоих электродах были одинаковыми, а для моделирования сквозного течения начальные плотности тока инжекции на левом электроде были в два раза выше, чем на правом.

Для уравнения Навье-Стокса на верхней и нижней границах, а также на электродах EF и MN задавалось условие прилипания $v = 0$. На границе АВ задавался входящий поток жидкости, скорость которого была равна скорости потока на границе CD ($v = v_{right}$). На границе CD задавался выходящий поток с давлением равным давлению на границе АВ, без вязкого сопротивления следующим равенством: $[\mu(\nabla v + (\nabla v)^T)] \cdot N = 0$.

Встречные ЭГД-течения в канале.

Рассмотрим процесс установления встречных ЭГД-течений. Начальные условия: включение напряжения 10 кВ в неподвижной жидкости с однородной проводимостью равной равновесному значению. Плотности токов инжекции на обоих электродах одинаковы. Подвижности и коэффициенты диффузии инжектированных и диссоциированных ионов одинаковы и равны.

Рассмотрим распределения концентрации различных сортов ионов в последовательные моменты времени. На рис. 6.6. приводится распределение концентрации положительных инжектированных ионов в различные моменты времени. За 0.02 с вблизи положительного электрода за счет миграции вдоль силовых линий поля формируется кольцевые слои избытка ионов, инжектированных с положительного электрода. Далее из кольцевого приэлектродного слоя, формируется центральная струйка положительных ионов, распространяющиеся вдоль оси модели, струйка от положительного электрода распространяется в направлении отрицательного электрода. Примерно за 0.1 с струя положительных инжектированных ионов встречается со встречной струйкой отрицательных ионов (см. рис. 6.6),

после столкновения встречных струй направление их движения изменяется. Струйки повышенной концентрации положительных и отрицательных ионов, изменяют направления движения и движутся параллельно в направлении диэлектрических стенок. Далее после столкновения со стенкой струйка положительных инжектированных частиц раздваивается. С течением времени данный сорт ионов однородно распределяется в канале и гибнет в результате рекомбинации. Однако часть инжектированных положительных ионов скапливается на стенке канала. В канале устанавливается ячеистое течение. Распределение центральной струйки отрицательных инжектированных ионов, симметрично распределению положительных инжектированных ионов относительно вертикальной прямой, проходящей через середину МЭП. В связи с эти распределения концентрации отрицательных частиц не приводятся.

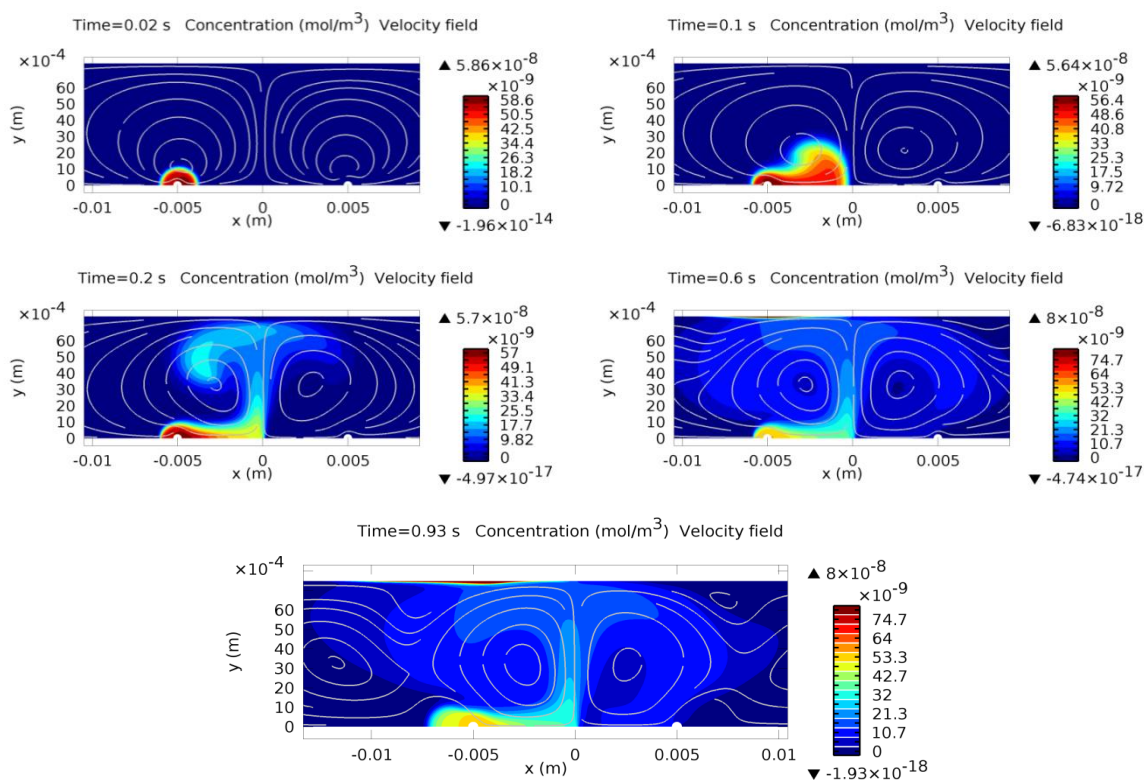


Рис. 6.6 Распределение концентрации положительных инжектированных ионов в центральной струе ЭГД-течения в последовательные моменты времени после подачи разности потенциалов на электроды.

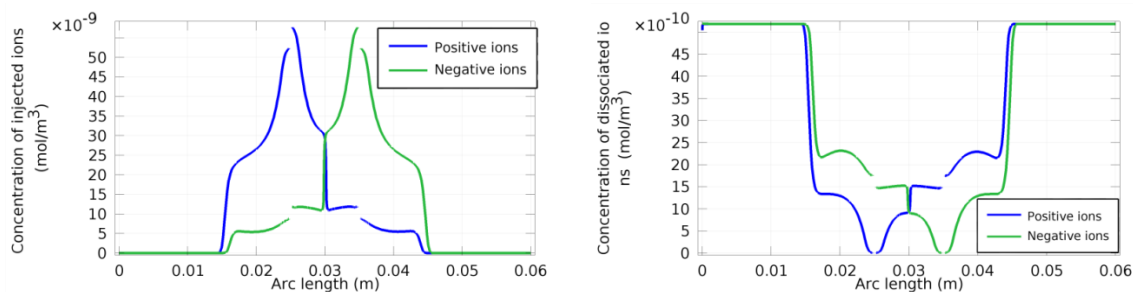


Рис. 6.7 Осевые распределения концентрации инжектированных (слева) и диссоциированных (справа) ионов.

Рассмотрим продольное (вдоль центральных струй) распределение концентрации инжектированных и диссоциированных ионов (Рис. 6.7) в установившемся режиме в последний момент времени (1.3 с). Максимум концентрации находится у поверхности электродов, к середине межэлектродного промежутка концентрация инжектированных ионов

спадает почти в два раза из-за рекомбинации с диссоциированными ионами. После встречи противоположно заряженных струй она скачком понижается еще больше за счет рекомбинации с инжектированными ионами противоположного знака. На рис. 6.8 приводится распределение плотности объемного заряда в последовательные моменты времени. В начальные моменты времени у электродов образуются кольцевые слои гомозаряда. Далее из приэлектродных слоев возникают две противоположно заряженные центральные струйки, которые встречаются в середине межэлектродного промежутка. Далее противоположно заряженные струи раздваиваются и разворачиваются, и далее движутся параллельно друг другу в направлении диэлектрических стенок. Затем в канале образуются четыре противоположно заряженные ячейки. Следует отметить, что поперечные размеры заряженных струй, несколько шире, чем размеры струек инжектированного заряда. На диэлектрической стенке происходит накопление заряженных частиц, поэтому около них формируется избыточный объемный заряд.

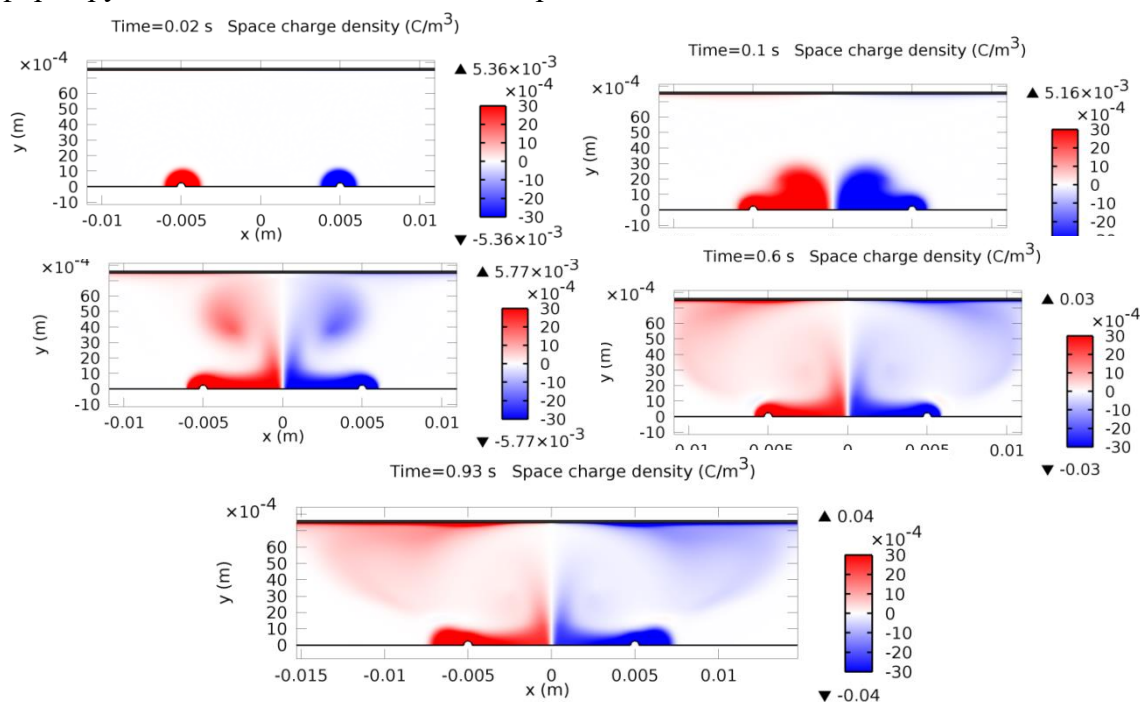


Рис. 6.8 Распределение плотности объемного заряда в последовательные моменты времени в межэлектродном промежутке.

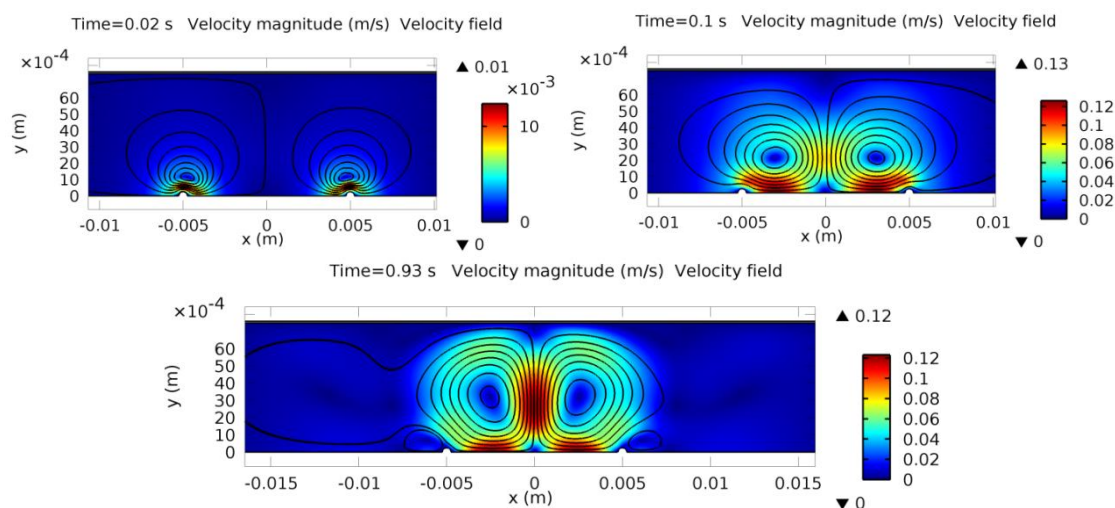


Рис. 6.9 Распределение скорости во встречных струях ЭГД-течения в последовательные моменты времени после включения напряжения.

В рассматриваемой симметричной системе электродов формируется встречное четырех ячеечное ЭГД-течение. Сквозное течение через канал не возникает. Далее приводится распределение скорости (рис. 6.9) в последовательные моменты времени после включения напряжения. В начальные моменты времени микровихри встречных ЭГД-течений сосредоточены у электродов. По мере развития течения максимумы скорости смещаются в межэлектродный промежуток. Когда противоположно заряженные центральные струи встречаются в середине МЭП, в канале формируется симметричное встречное четырех ячеечное течение.

На рис.6.10 приведены зависимости тока инжектированных и диссоциированных ионов и полного тока. Через 0,2 с после включения напряжения полный ток выходит на квазистационарное значение. Основной вклад в полный ток вносит ток инжектированных ионов, поэтому зависимости полного тока и тока инжектированных ионов близки. Когда противоположно заряженные струи встречаются в середине МЭП, на зависимости тока инжектированных ионов и зависимости полного тока от времени наблюдается локальный максимум (0.1 с), а на графике зависимости тока диссоциированных ионов локальный минимум.

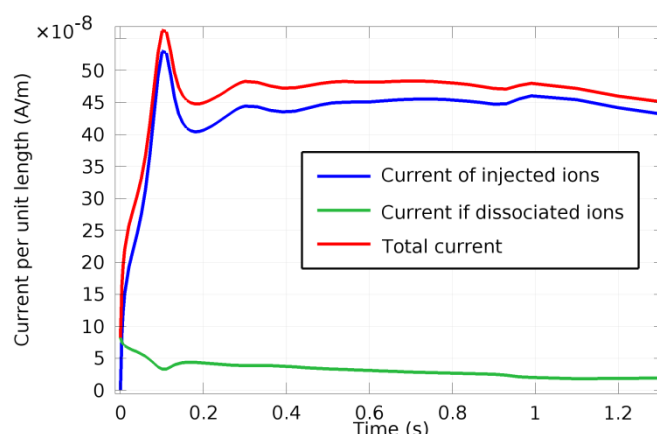


Рис. 6.10 Зависимость токов инжектированных, диссоциированных ионов и полного тока от времени.

После этого ток инжектированных ионов уменьшается из-за уменьшения концентрации инжектированных ионов за счет возросшей рекомбинации. Когда инжектированные положительные ионы достигают отрицательного электрода, а отрицательные инжектированные ионы достигают положительного электрода, около электродов изменяется плотность объемного заряда, а значит и напряженность электрического поля, в результате чего токи инжекции несколько увеличиваются. Далее наблюдаются небольшие флуктуации тока.

При равенстве токов инжекции с положительного и отрицательного электродов в замкнутом канале формируются две встречные электрогидродинамические струи от каждого электрода, образующих четыре замкнутые ячейки, локализованные в межэлектродном промежутке. Сквозное ЭГД-течение в канале не возникает.

Анализ процесса установления сквозного ЭГД-течения при разных токах инъекции с положительного и отрицательного электродов [6.15].

Процесс формирования сквозного ЭГД-течения в симметричной системе электродов, начинается с образования приэлектродных заряженных слоев. В этом процессе определяющим являются встречные миграционные токи инжектированных и диссоциированных ионов. Поэтому подвижность ионов должна играть существенную роль в формировании приэлектродных заряженных слоев, а также развитии ЭГД-течений. В реальных условиях подвижности ионов связаны с их размерами. Диссоциированные ионы рождаются путем распада молекул примесей, поэтому их размеры меньше размеров исходной молекулы. Размеры инжектированных ионов совпадают с размерами молекул примесей, поэтому их подвижность может быть существенно меньше подвижности диссоциированных ионов. В данном разделе рассматривается пример, когда подвижности инжектированных ионов существенно, в 5 раз меньше подвижности диссоциированных ионов, подвижность которых как и ранее равна. В начальный момент проводимость жидкости однородна и равна равновесной $3 \cdot 10^{-11}$ Сим/м, течение в жидкости отсутствует.

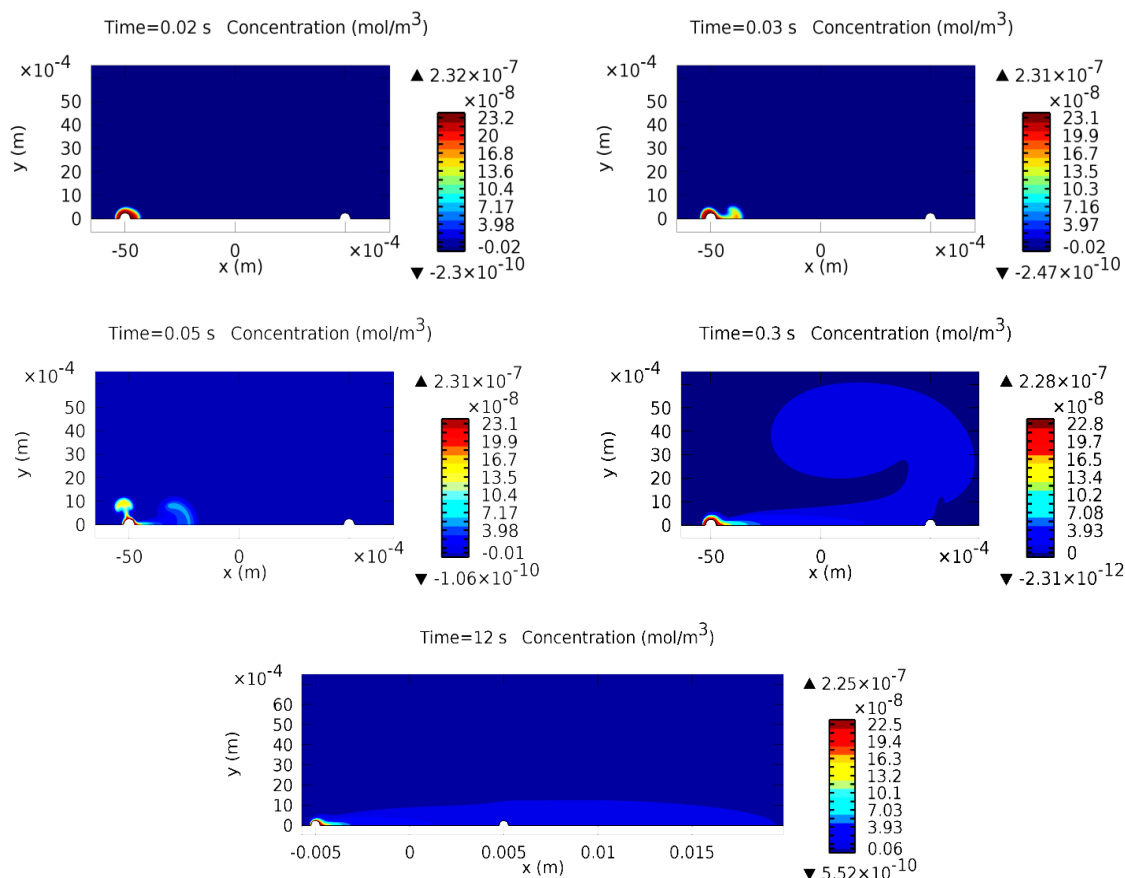


Рис. 6.11. Распределение концентрации положительных инжектированных ионов в различные моменты.

Рассмотрим результаты моделирования процесса установления течения в канале при ступенчатой подаче на электроды разности потенциалов ± 10 кВ. Токи инъекции на положительном (левом) электроде в два раза больше тока инъекции на отрицательном (правом) электроде. Рассмотрим результаты решения. В начальные моменты у активного положительного электрода формируется избыток инжектированных ионов одноименного с

электродом знака. Так как подвижность инжектированных ионов меньше подвижности диссоциированных ионов, для того чтобы инжектированные ионы проникли в межэлектродный промежуток необходимо больше времени по сравнению со случаем с одинаковыми подвижностями ионов. Поэтому при одинаковой плотности тока инжекции плотность заряда инжектированных ионов в приэлектродном рекомбинационном слое значительно выше. В этом случае объемный заряд, поступивший в приэлектродную область, формирует первичную продольную струйку, проникающую в жидкость вдоль центральной силовой линии поля. При этом напряженность поля у этой части поверхности положительного электрода понижается, а, следовательно, понижается и плотность тока инжекции. На остальной части боковой поверхности электрода цилиндрической формы напряженность понижается слабее. Поэтому кроме центральной струйки положительных ионов, направленной к противозлектроду, в момент времени 0.05 с формируется вторичная струйка, исходящая от боковой поверхности, направленная вдоль боковой силовой линии поля к стенке канала, причем эта струя более интенсивная. Однако условия развития этих двух струек различные. По мере развития течения центральная струйка создает поток вдоль канала, который в момент времени 0.07 сносит вторичную поперечную струйку, и она, в конце концов, сливается с первичной продольной струйкой ионов, движущихся к противозлектроду.

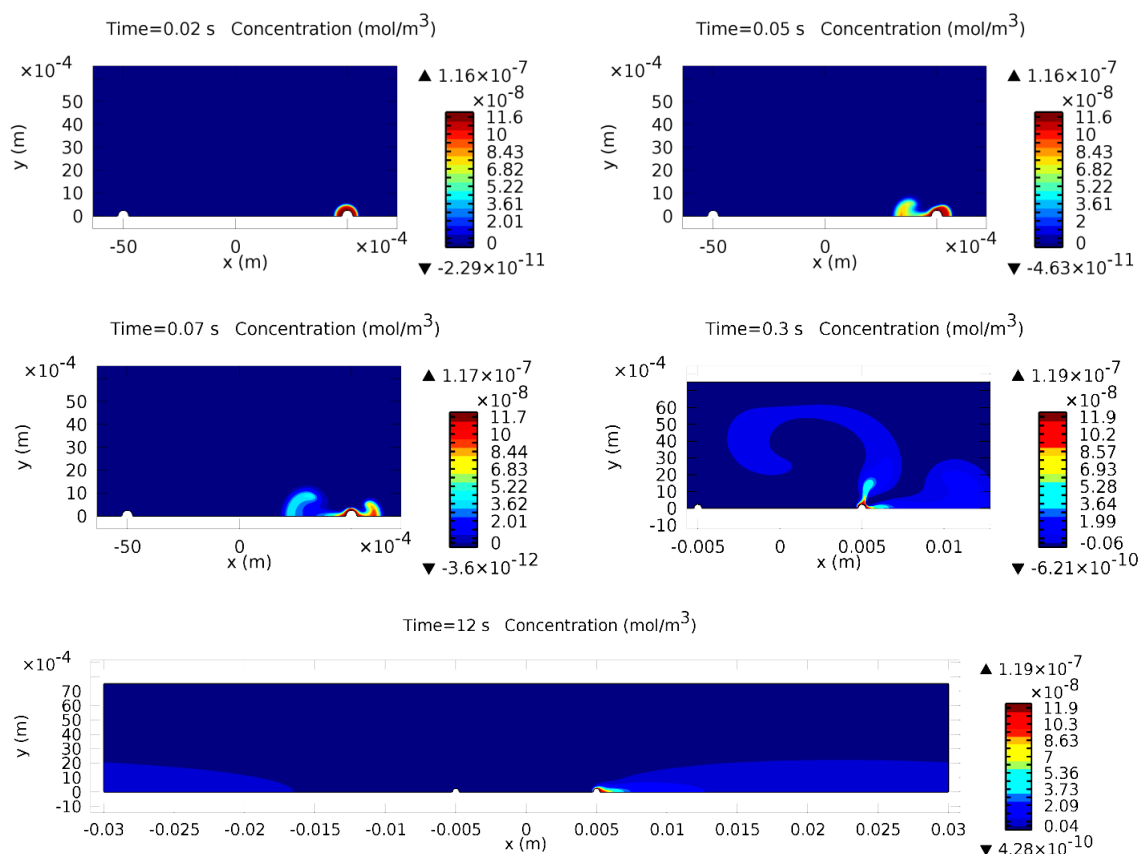


Рис. 6.12. Распределение концентрации отрицательных инжектированных ионов в последовательные моменты времени.

Далее положительные инжектированные ионы достигают пассивного отрицательно-го электрода и проникают в заэлектродную область. Через 12 с в канале формируется классическое ламинарное сквозное ЭГД-течение, не имеющее вихрей в межэлектродном промежутке. Концентрация положительных инжектированных ионов из-за рекомбинации с ионами противоположного знака быстро спадает вдоль канала. Структура распределения концентрации положительных диссоциированных ионов иная. В начальные моменты вре-

мени у положительного электрода формируется слой дефицита этих ионов. Далее из этого слоя развиваются струйки пониженной концентрации диссоциированных ионов, которые также достигают противоиэлектрода и проникают в заэлектродное пространство. У пассивного отрицательного электрода также формируется приэлектродный слой повышенной концентрации инжектированных отрицательных ионов. В момент времени 0.05 с от отрицательного электрода формируется встречная струйка отрицательных ионов, направленная к положительному электроду. Когда эта струйка, распространяющаяся от положительного электрода, встречается с отрицательно заряженной струйкой, она сносит струйку отрицательных ионов в заэлектродную область, формируя в заэлектродной области единую биполярно заряженную струю. Примерно через 0,3 с после начала инъекции отрицательно заряженная струйка сносится в заэлектродную область.

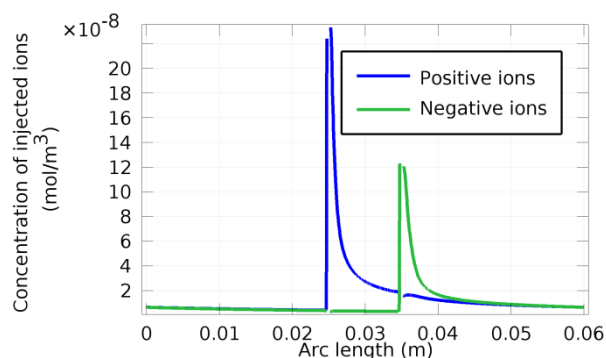


Рис. 6.13. Осевые распределения концентрации инжектированных ионов

На Рис. 6.13 приведены линейные распределения концентрации инжектированных ионов вдоль плоскости симметрии канала. Видно, что положительные ионы возникают на положительном электроде, вдоль межэлектродного промежутка концентрация этих ионов быстро падает и у пассивного электрода она гораздо меньше концентрации инжектированных отрицательных ионов, так как они гибнут в межэлектродном промежутке в результате рекомбинации.

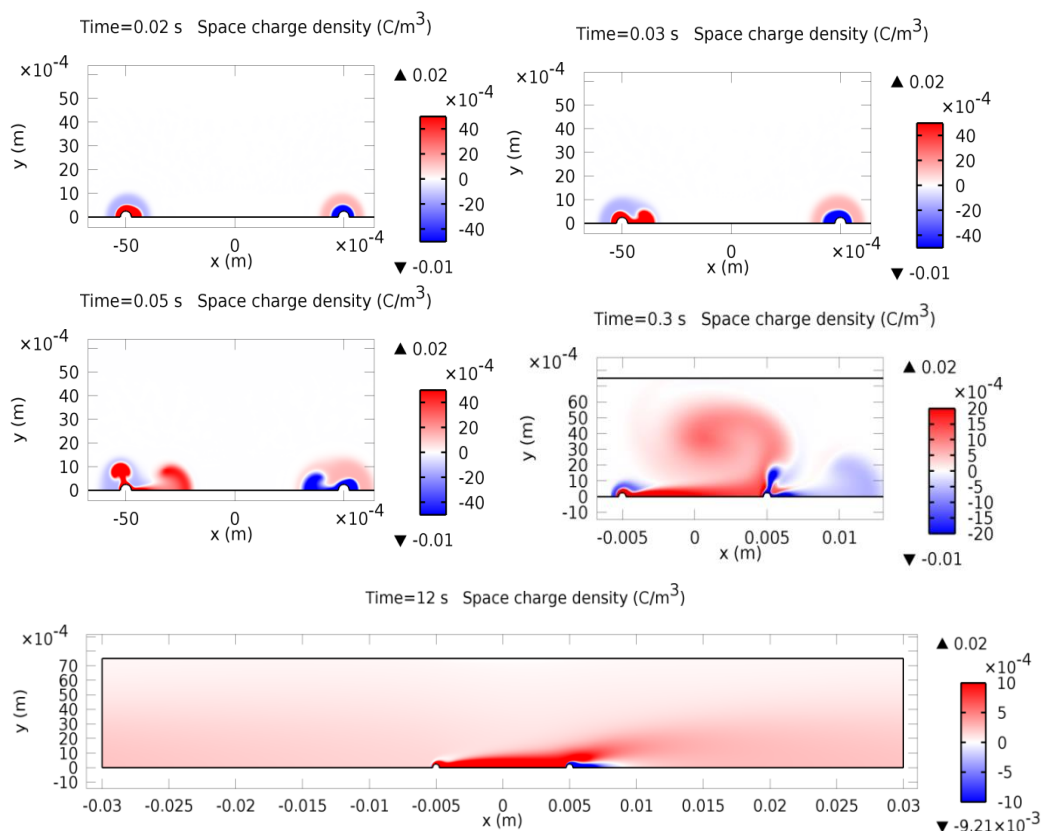


Рис. 6.14. Распределение плотности объемного заряда в последовательные моменты времени.

В заэлектродной области гибель отрицательных ионов также происходит достаточно

быстро и на расстоянии 1 см за электродом концентрации ионов сравниваются. Так как у электродов появляется избыток инжектированных ионов соответствующего знака, у электродов формируются кольцевые слои гомозаряда (рис.6.14.). В первые моменты времени (0.02с) приэлектродные слои имеют биполярную структуру, непосредственно у поверхности электрода сосредоточен гомозаряд, после которого идет слой гетерозаряда. Биполярная структура возникает, когда подвижность диссоциированных ионов больше подвижности инжектированных ионов. Подобные биполярные структуры обнаружены в экспериментах, описанных в главе 3. Эти структуры возникают в приэлектродных ионизационно-рекомбинационных слоях. В момент времени 0.03 с. у активного электрода возникает первичная положительно заряженная струйка, которая проникает через слой гетерозаряда по направлению к противоэлектроду. В момент 0.05 с от положительного активного электрода возникает вторичная поперечная струйка, а у пассивного электрода возникает встречная отрицательная струйка. Поскольку плотность объемного заряда в положительной струйке выше, то положительная струйка более интенсивная и она сносит встречную отрицательную струйку (0,05 с) и формирует в канале сквозное течение, которое сносит также и поперечную струйку и от активного электрода формируется единая положительно заряженная струя ($t=0.81$ с), при этом непосредственно у активного электрода внутри слоя положительного заряда сохраняется тонкий слой отрицательного объемного заряда, а за пассивным электродом внутри слоя положительного заряда сохраняется слой отрицательного объемного заряда, таким образом формируется биполярная зарядовая структура: вдоль плоскости симметрии сохраняется слой отрицательного заряда, выше которого идет слой положительного заряда.

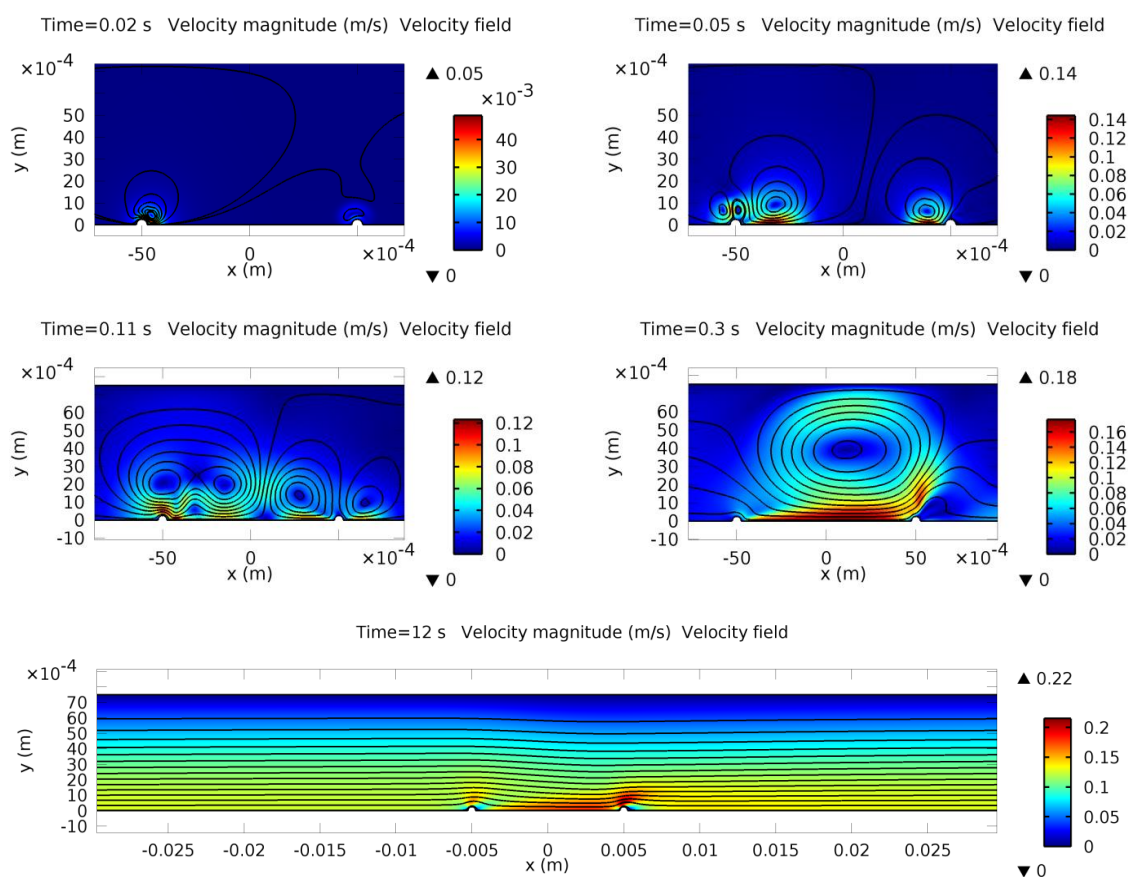


Рис.6.15 Распределение скорости течения и линий тока жидкости в последовательные моменты времени.

Видно, что распределение объемного заряда существенно отличается от распределения концентрации инжектированных ионов. Так, например, область положительного заряда в заэлектродной области значительно шире центральной струйки инжектированных ионов, причем заряженная жидкость возвращается к активному электроду. Анализ процесса установления скоростной структуры ЭГД-течения показывает (см. рис. 6.15): на начальных этапах от электродов формируется несколько встречных струй, направленных в разные стороны, поэтому на начальных моментах у электродов образуется несколько микро вихрей. Со временем разнонаправленные струйки от положительного электрода сливаются в одну, которая после встречи с потоком жидкости от отрицательного электрода, сносит его за электродную область. В канале формируется сквозное ламинарное однонаправленное ЭГД-течение слева на право без внутренних вихрей в межэлектродном промежутке. Линии тока сквозного течения на входе и выходе из канала взаимно параллельны и параллельны стенкам канала. Следует отметить, что в четырех ионной модели плотность объемного заряда равна сумме концентраций всех четырех типов ионов с учетом их знака. Поэтому распределение плотности объемного заряда отличается от распределения концентраций инжектированных ионов. Заряженная струйка значительно шире, на конечных этапах заметно возвратное проникновение положительного заряда через правую границу в левую часть канала. Осяевой график распределения скорости установившегося течения имеет типовой вид (рис.6.16).

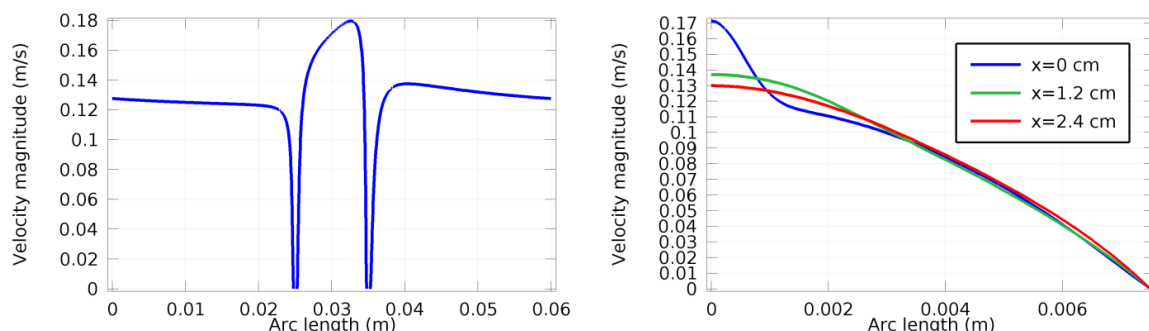


Рис.6.16 Осяевой и профильные распределения скорости в последний момент времени.

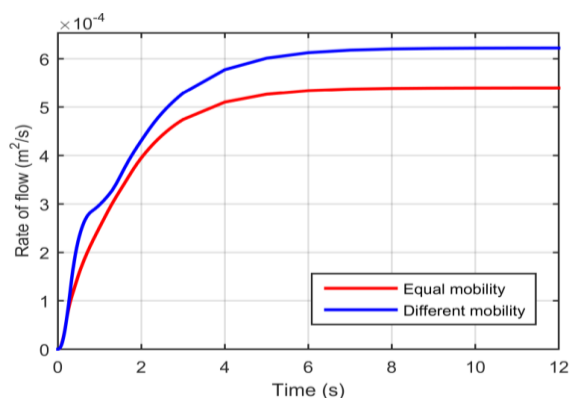


Рис. 6.17 Зависимость расхода жидкости от времени.

Основное ускорение жидкости происходит у активного электрода, а затем менее интенсивное на протяжении всего межэлектродного промежутка и после отрицательного электрода в заэлектродной области, а в остальной части канала скорость течения медленно спадает в результате вязких потерь. В межэлектродном промежутке ближе к плоскости симметрии профиль скорости носит Гауссов характер, специфичный для силового течения, а далее вдоль канала профиль скорости изменяется и к правому концу канала приобретает параболический вид, характерный для Пуазейлевского вязко-диссипативного течения.

Далее (см. рис.6.17) приводится зависимость расхода жидкости через канал от времени при разных подвижностях инжектированных и диссоциированных ионов и, для сравнения в модели, учитывающей одинаковые подвижности всех сортов ионов. После включения напряжения расход жидкости через правую границу канала монотонно возрастает в течение 6 с до выхода на стационарное значение. Это время

соответствует полному времени формирования сквозного течения в канале и времени возврата заряженной жидкости к активному электроду. При разных подвижностях ионов зависимость имеет характерный вид с двумя участками роста: на первом скорость роста расхода повышена, затем небольшой участок насыщения, далее рост с меньшей крутизной и вновь участок насыщения. При одинаковых подвижностях наблюдается плавный рост с выходом на участок насыщения. Установившийся расход жидкости в канале больше при разных подвижностях ионов примерно на 13%.

Таким образом четырех ионная модель, учитывающая различия подвижности инжектированных и диссоциированных ионов, более точно описывает процессы формирования сквозного ЭГД-течения.

Униполярная инжекция в непроводящую жидкость [6.8].

Рассмотрим теперь крайне асимметричный случай униполярной инжекции в симметричной системе типа провод-провод в непроводящую жидкость. В модели это можно реализовать, если оставить инжекцию только на одном, например, положительном электроде (слева), а инжекцию с отрицательного электрода (справа) положить равной нулю. Это одно ионная модель: когда в жидкости имеется только один инжектируемый ион.

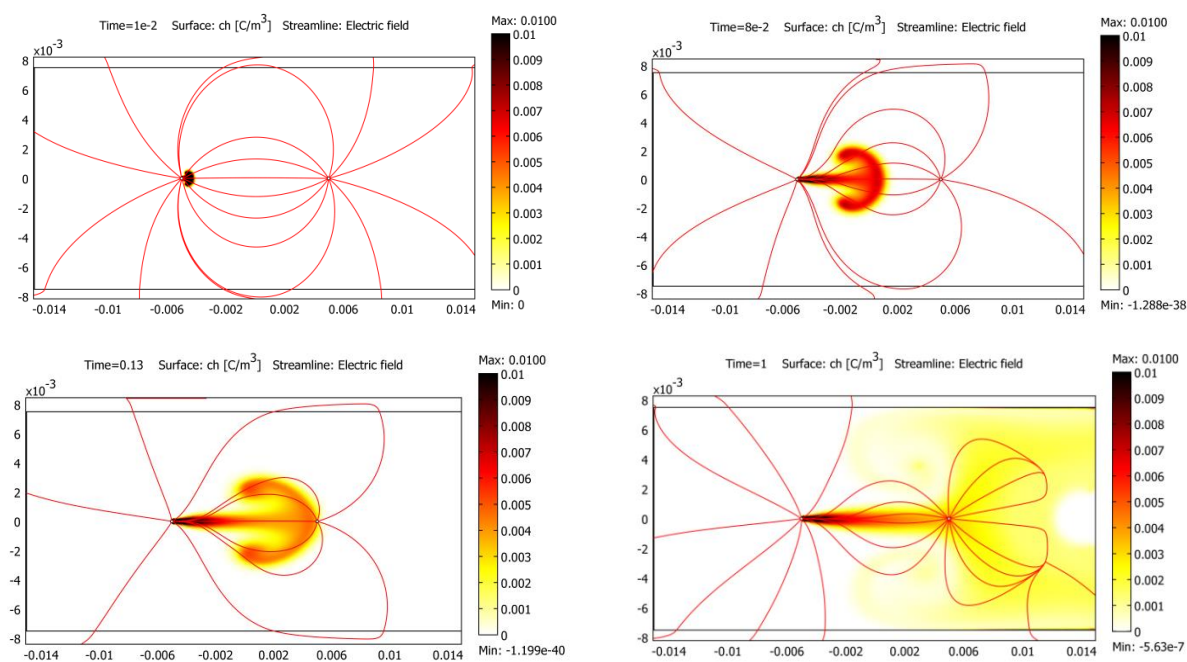


Рис.6.18 Эволюция распределения заряда и силовые линии поля после включения напряжения в центрально струе для случая униполярной инжекции.

На рис.6.18 приведена динамика установления распределений объемного заряда после подачи разности потенциалов на электроды, а также силовые линии электрического поля. В начальные моменты времени за время 0,001 сек. на фоне симметричных, пока еще не возмущенных объемным зарядом, силовых линий электрического поля у положительного электрода под действием тока инжекции формируется слой положительного заряда

цилиндрической формы. Из этого слоя формируется тонкая заряженная струйка, которая в течении 0,1 с. распространяется к отрицательному электроду, заметно искажая силовые линии поля.

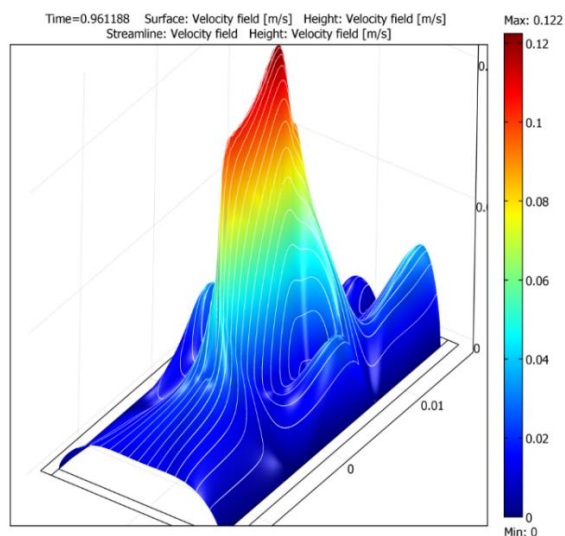


Рис. 6. 19 Распределение модуля скорости в центрально струе ЭГД-течения при униполярной инжекции.

После достижения зарядовой струйкой противозэлектрода, происходит частичный разряд перенесенного заряда на отрицательном электроде, а также накопление некомпенсированного объемного заряда в заэлектродной области канала. Через 1 сек. можно отметить, что за пассивным электродом возникло облако положительного заряда (зарядовая пробка), где сила Кулона действует на жидкость в обратную сторону, мешая сквозной прокачке жидкости по каналу. В результате в канале формируется специфический профиль течения (см. рис. 6.19).

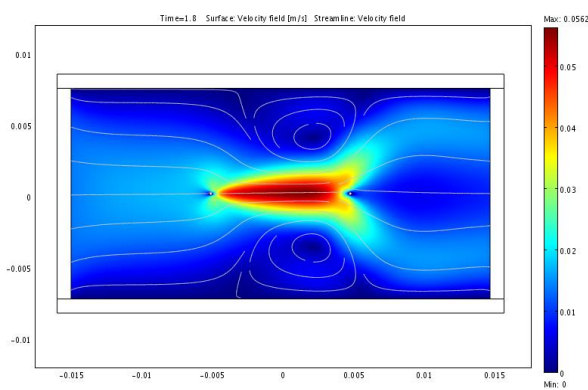
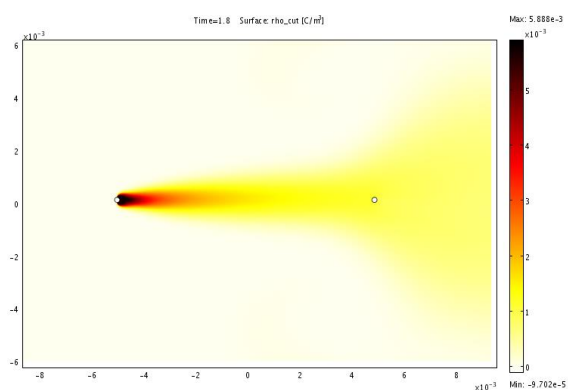


Рис.6. 20 а) Распределение плотности электрического заряда в установившемся режиме. б) Распределение скоростей и линий тока жидкости

На трехмерном графике скорости в межэлектродном промежутке видна тонкая центральная струйка высокой скорости: у активного электрода жидкость быстро ускоряется, затем имеется область слабого ускорения и область торможения у противозэлектрода. За пассивным электродом жидкость тормозится и разделяется на четыре струйки: две обтекают неподвижную область за пассивным электродом и образуют сквозное течение через канал, а две возвращаются вдоль стенок к активному электроду, образуя внутренние вихри в межэлектродном промежутке. На рис. 6.20 приведены для сравнения зарядовая (слева) и ско-

ростная (справа) структура сквозного течения. От активного электрода к пассивному распространяется тонкая струйка, заряженная одноименно с ним (см.рис.6. 20). Плотность заряда в струйке быстро падает в направлении распространения, а ее поперечные размеры растут: в межэлектродном промежутке относительно медленно, а за его пределами быстро. Распределения скоростей в межэлектродном промежутке, как и в случае течения в замкнутом объеме, имеет зонную структуру. Короткая зона ускорения у активного электрода, зона однородного течения и зона торможения у пассивного электрода. В канале наблюдается смешанное течение: часть жидкости у стенок канала течет насквозь, а центральная часть образует две замкнутые ячейки. Течение в канале похоже на течение в закрытых объемах. Причиной этому является образование т.н. зарядовой пробки за пассивным электродом. Кулоновские силы, действующие на заряженную жидкость за пределами межэлектродного промежутка, тормозят ее и вызывают образование замкнутых ячеек в межэлектродном промежутке. Энергия, идущая на формирование внутренних вихрей, снижает эффективность сквозного течения.

Моделирования сквозного ЭГД-течения при биполярной инжекции в непроводящую жидкость [6.11].

Рассмотрим случай биполярной инжекции в непроводящую жидкость используя двух ионную модель. В жидкости имеются ионы, образующиеся за счет инжекции с обоих электродов.

Сквозное течение без внутренних вихрей возникает только в случае определенного сбалансированного сочетания уровней инжекции на обоих электродах. Если в системе с симметричными электродами, искусственно создать сбалансированную электрохимическую асимметрию, благодаря которой токи инжекции с электродов отличаются в 1,5-2 раза, то расчеты показывают следующую картину динамики развития распределений плотности электрического заряда. Как видно из распределений плотности заряда, представленных на рис.6.21, также, как и для четырех ионной модели существуют три характерных этапа развития ЭГД течения:

1. Формирование приэлектродного зарядового слоя одноименного с электродом знака ($0-0.01\text{с}$). На этом этапе за счет инжекции с поверхности обоих электродов в жидкость вносится пространственный заряд одноименного с электродом знака. Далее за счет миграции и диффузии он перемещается на некоторое расстояние от поверхности электрода, образуя кольцевой заряженный слой. В остальной жидкости ионов нет. Структура приэлектродных слоев более простая (униполярная, а не биполярная), чем в четырех ионной модели.
2. Движение противоположно заряженных струй на встречу друг другу и встреча их в районе середины межэлектродного промежутка (МЭП) ($0.01-0.1\text{с}$). Плотность объемного заряда в струйках в процессе их движения падает медленнее, т.к. не рекомбинации. Поскольку, плотность положительного заряда в струйке, текущей от положительного электрода выше, чем у отрицательного, то после встречи противоположно заряженных струй, происходит снос отрицательной струйки в заэлектродный промежуток.
3. Формирование сквозного течения ($0.14-3\text{с}$). После сноса отрицательной струйки, возникает сквозное однонаправленное течение направо, то есть зарождается сквозная прокачка жидкости через канал. За время формирования сквозного течения на

стенки канала осаждается отрицательный заряд, который с течением времени, сносится конвективным потоком и рекомбинирует с положительным зарядом.

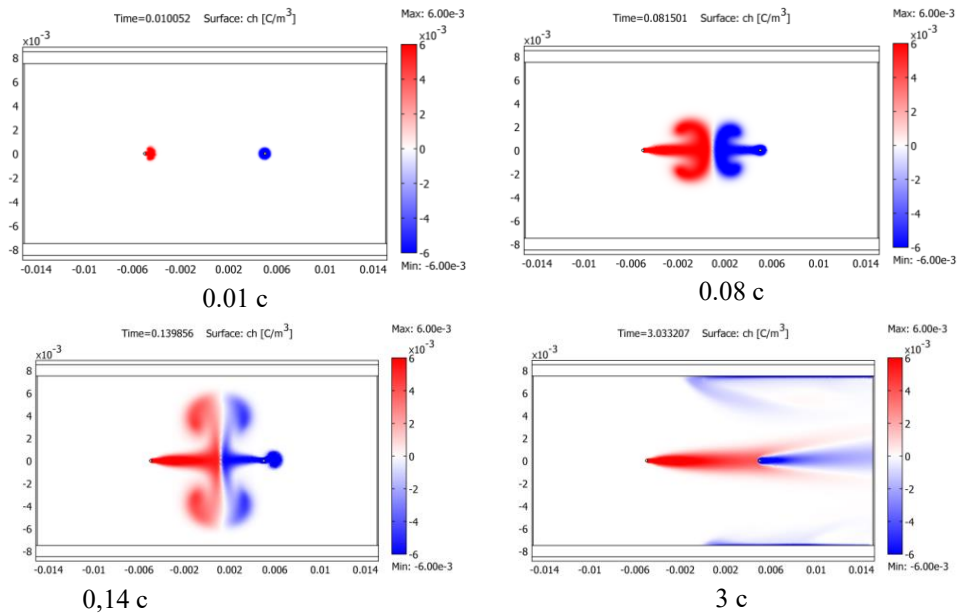


Рис. 6.21. Динамика установления сквозного ЭГД-течения.

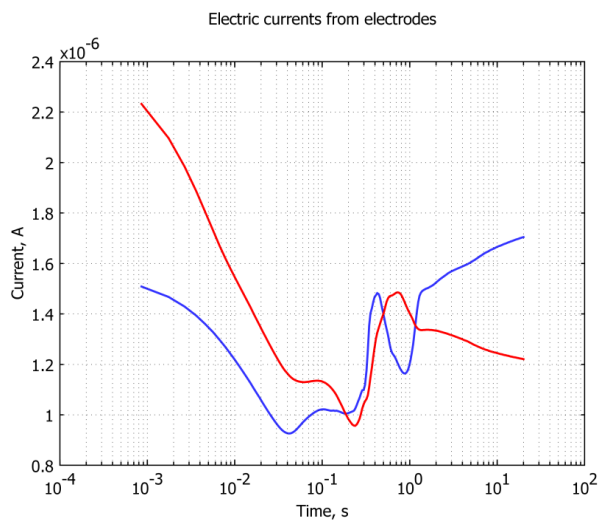


Рис. 6.22. Зависимость электрического тока с электродов от времени. Красный – положительный электрод, синий – отрицательный.

Таким образом, существуют три характерных времени различающиеся друг от друга на порядок: время формирования приэлектродного зарядового слоя (~ 0.01 с), время пересечения зарядовой струйкой межэлектродного промежутка до столкновения зарядовых областей разных знаков (~ 0.1 с) и время установления сквозного течения (~ 1 с). Анализ временной зависимости тока инъекции на обоих электродах (см. рис. 6.22) показывает, что токи с положительного (активного) и отрицательного (пассивного) электрода по мере формирования заряженной струи падают, однако падение тока с активного электрода происходит быстрее и поэтому их величины сближаются. После встречи

заряженных струй, токи несколько подрастают, за счет появления рекомбинации, а далее рост отрицательного тока превышает рост положительного и токи инъекции с обоих электродов к моменту возникновения сквозного течения сравниваются. Затем рост отрицательного тока несколько опережает положительный ток. Для достижения полного баланса токов необходимо очень точно подбирать функции инъекции таким образом, чтобы в заэлектродной области в области биполярно заряженной струи противозаряды полностью рекомбинировали, чтобы заряд, выносимый за пределы канала был равен нулю. Сделать

это практически невозможно, поскольку в нашей системе имеется сильный нелинейный эффект, связанный с тем, что распределение плотности электрического заряда может сильно влиять на электрическое поле. Это влияние особенно заметно у отрицательного электрода, у которого приходящий положительный заряд усиливает электрическое поле. Увеличение электрического поля приводит к росту инжектируемого тока, причем, поскольку ток инжекции экспоненциально зависит от поля, то мы в итоге получаем значительный рост тока с отрицательного электрода.

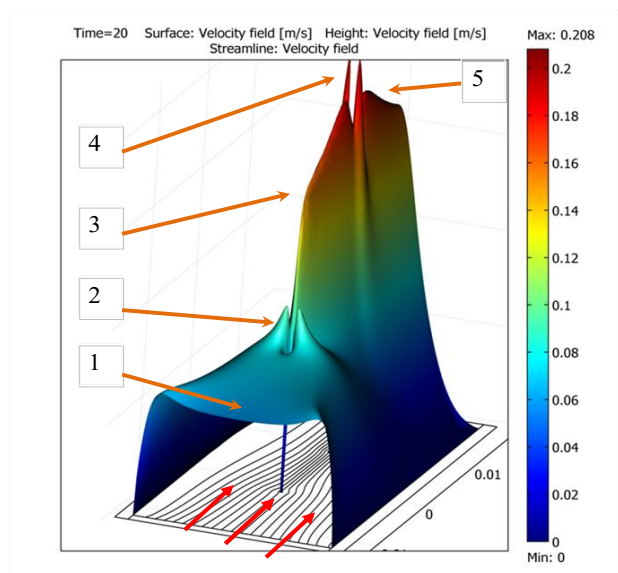


Рис. 6.23. Трехмерный график распределения модуля скорости ЭГД течения в центральной струе ЭГД-течения. Красными стрелками показано направление сквозного течения.

Колебания токов инжекции с каждого из электродов могут продолжаться достаточно долго. Следует отметить еще один эффект накопления объемного заряда у стенок из диэлектрического материала (см. рис. 6.21). Этот эффект может оказывать существенное влияние на распространение центральной струи и интенсивность инжекции в случае узких каналов.

Рассмотрим более подробно типичный результат сквозного ЭГД-течения на трехмерном графике. Ширина канала здесь выбрана равной 1.5 см, расстояние между электродами – 1 см, отношение токов инжекций составляет 1:3. На графике приведено распределение модуля скорости течения в центральной струе, на плоскости приведены линии тока жидкости: На входе

канала линии тока взаимно параллельны, течение однородно. У поверхности активного электрода линии тока несколько сужаются и обтекают его. На рис.6.23 можно выделить следующие характерные участки центральной струи сквозного ЭГД-течения:

1. Симметричные небольшие зоны ускорения скорости по обеим сторонам активного электрода. Наличие этих зон связано с тем, что за активным электродом имеется минимум давления, и жидкость втягивается под активный электрод за счет больших значений градиентов давления.
2. Узкая зона интенсивного ускорения у активного электрода и зона менее интенсивного ускорения на протяжении всего межэлектродного промежутка. Здесь происходит основной разгон жидкости. Из графиков распределения объемного заряда мы видим, что в МЭП имеется узкая полоска с распределенной объемной силой. Максимум скорости достигается вблизи пассивного электрода. Далее начинается небольшое торможение у поверхности противоиэлектрода. Подобная структура резко отличается от течений в замкнутой кювете и от течения при униполярной инжекции в канале, прежде всего длинной зоной ускорения и очень слабовыраженной зоной торможения у противоиэлектрода.
3. Симметричные боковые зоны ускорения у боковой поверхности пассивного электрода. Как и в случае зоны 2, эти максимумы вызваны тем, что за пассивным электродом имеется глубокий минимум давления жидкости, связанный с инжекцией отрицательного заряда, обеспечивающая локальный подсос жидкости в эту область.

4. За пассивным электродом имеется небольшая зона ускорения жидкости, которое обусловлено поступлением в заэлектродную область отрицательного заряда с пассивного электрода и появлением положительной объемной Кулоновской силы за электродом. Это является отличительной особенностью такого типа течений, поскольку сила Кулона и в заэлектродной области ускоряет жидкость, т.к. в нее поступает заряд, инжектируемый пассивным электродом. После зоны вторичного ускорения мы можем наблюдать слабое торможение жидкости.

Следует особо отметить протяженность зоны ускорения и практическое отсутствие зоны торможения в центральной струе сквозного ЭГД-течения. Такая структура определяется симметричной геометрией электродов. Если в несимметричной системе типа провод (игла) над плоскостью напряженность поля спадает при подходе к плоскому противоэлектроду и для организации эффективного вывода ускоренной конвективной доставки заряда необходимо искусственно повысить приэлектродную напряженность поля у плоского электрода за счет формирования области повышенной плотности объемного заряда, то в случае симметричной системы типа провод-провод ситуация иная. У противоэлектрода напряженность поля повышена благодаря геометрии системы, что позволяет выводить поступающий в центральной струйке заряд из приэлектродной области в ускоренном режиме. Оставшийся в центральной струйке заряд рекомбинирует с противозарядом поступающим с противоэлектрода в заэлектродной области.

Структура центральной струи сквозного ЭГД-течения в слабопроводящей жидкости при различных напряжениях [6.15]

В данном разделе рассматривается структура течений в замкнутом канале при различных уровнях инжекции с положительного и отрицательного электродов. Рассматривается четырехионная модель, подвижности всех ионов одинаковы. Исследуется течение методом динамических вольтамперных характеристик. Данный метод обычно используется для изучения процессов проводимости слабопроводящих жидкостей. Однако, как показано ранее, в области высоких напряжений проводимость приобретает конвективный характер. Поэтому исследование структуры ЭГД-течений в широком диапазоне напряжений необходимо для понимания особенностей ВАХ, а также для изучения особенностей их структуры в различных условиях. При надлежащем выборе скорости изменения напряжения процессы в жидкости можно считать квазиустановившимися. Поэтому, методом динамических ВАХ можно изучать структуру установившихся сквозных течений в широком диапазоне напряжений. На электроды подается напряжение, медленно, со скоростью 100 В/с, возрастающее до 30 кВ, затем уменьшающиеся до нуля. Граничные условия и геометрия описаны выше. Токи инжекции на электродах задаются в виде квадратичного полинома от локальной напряженности электрического поля по формуле:

$$j = (A \cdot |E| + B \cdot |E|^2) \cdot N \quad (6.21)$$

Где коэффициенты А и В зависят от материала рассматриваемых электродов и примесных добавок к жидкости. Коэффициенты подбирались таким образом, чтобы начальные плотности тока инжекции на левом электроде были в два раза выше, чем на правом. Свойства жидкости соответствует свойствам очищенного трансформаторного масла: $b_i = 10^{-8} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$, $D_i = 2.59 \cdot 10^{-9}$, $|z_i| = 1$, $\gamma = 950 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 4.75 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\sigma_0 = 3 \cdot 10^{-11} \text{ С/м}$, $\sigma_0 = 3 \cdot 10^{-11} \text{ С/м}$

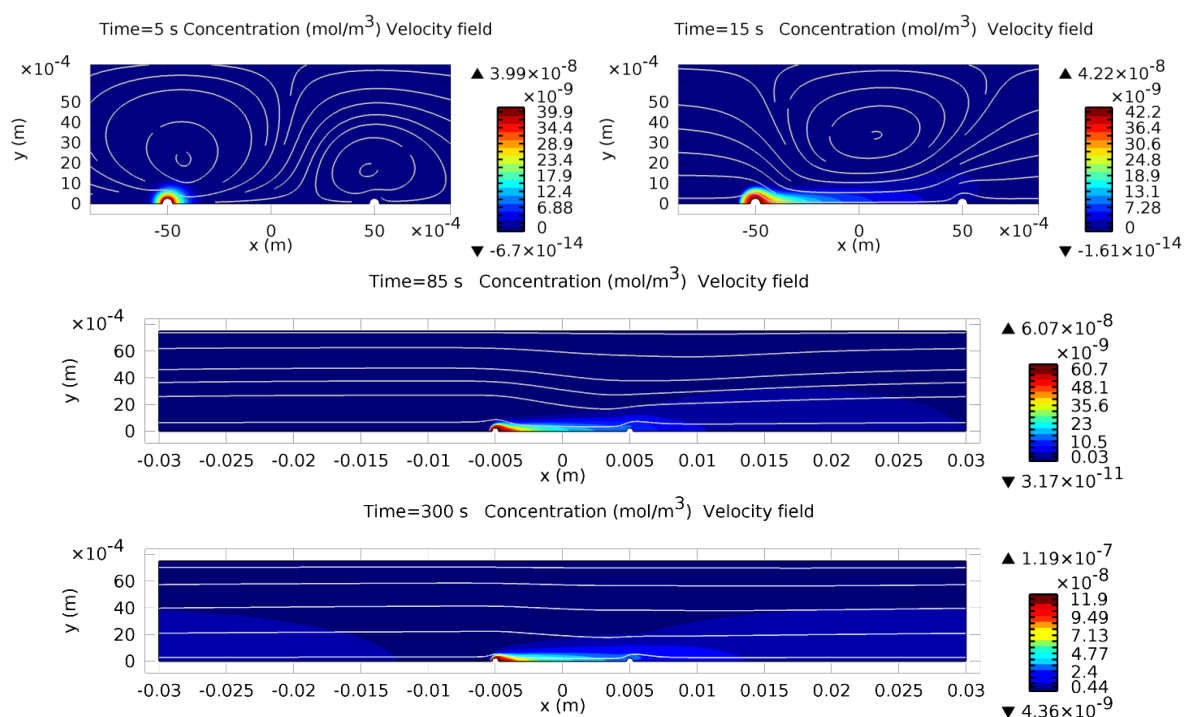


Рис. 6.24 Распределения концентрации положительных инжектированных ионов при различных напряжениях

Рассмотрим распределение концентрации положительных инжектированных ионов при различных напряжениях. При малых напряжениях. ($t=5$ с, $U=0.45$ кВ) у активного электрода формируется приэлектродный слой избытка концентрации положительных инжектированных ионов. При одинаковых подвижностях этот слой имеет однополярную структуру. При напряжении 1,5 кВ ($t=15$ с, $U=1.5$ кВ) под действием электрического поля из приэлектродного слоя возникает струйка инжектированных ионов, которая пересекает межэлектродный промежуток. Эта струйка является центральной струйкой ЭГД-течения. В межэлектродном промежутке формируются замкнутые ячейки. При напряжении 8,5 кВ (85 с - $U=8.5$ кВ) ячейки в межэлектродном промежутке пропадают, а центральная струйка достигает правого электрода. Небольшая часть положительных инжектированных ионов проникает в заэлектродную область. Как видно по линиям тока течения возвратные вихри внутри межэлектродного промежутка исчезают и возникает сквозное течение через канал. Поэтому инжектированные ионы практически не возвращаются к активному электроду, так как рекомбинируют с отрицательными ионами, инжектируемыми с отрицательного электрода и диссоциированными ионами.

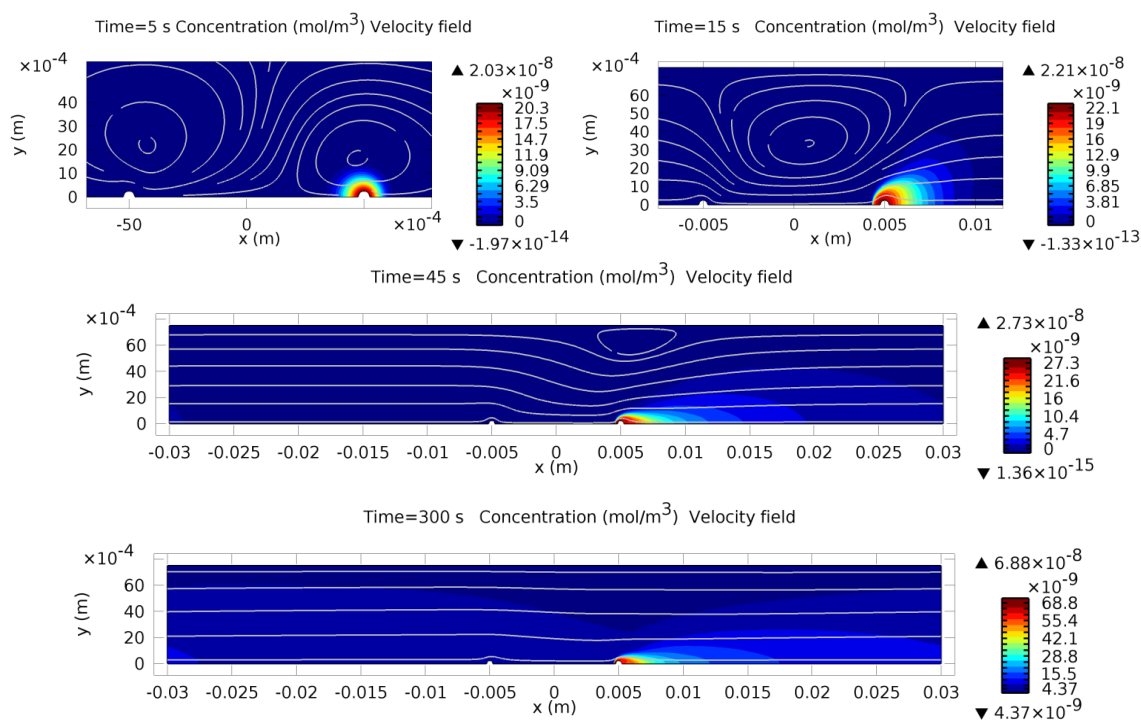


Рис. 6.25 Распределение концентрации инжектированных отрицательных ионов.

На рис. 6.25 приведены распределения объемного заряда в канале при различных напряжениях. При малых напряжениях (в первые моменты времени ($t=5$ с, $U=0.45$ кВ)) у пассивного электрода формируется слой избытка отрицательных инжектированных ионов (рис. 6.25.). При напряжении 1,5 кВ, когда струйка положительных инжектированных ионов достигает отрицательного электрода ($t=15$ с, $U=1.5$ кВ), она сносит инжектированные отрицательные ионы в заэлектродную область. При напряжении 4,5 кВ (45 с - $U=4.5$ кВ) струйка отрицательных ионов достигают правого конца канала. После этого отрицательные ионы возвращаются в левую часть канала и к моменту времени 90 с ($U=9$ кВ) достигают активного электрода. При достижении напряжением максимального значения ($t=300$ с, $U=30$ кВ) отрицательные инжектированные ионы сосредоточены в узкой центральной струе, а также в малых концентрациях по всему каналу.

В четырех ионной модели объемный заряд является суммой концентраций всех четырех типов ионов с учетом их знака. Именно объемный заряд, а не парциальные плотности заряда инжектированных ионов является причиной ЭГД-течений. Его распределение на различных этапах ЭГД-течения приведено на рис. 6.26. Когда с электродов начинается инжекция коионов, около них появляется слои одноименного объемного заряда ($t=5$ с, $U=0.45$ кВ). Поскольку в данной модели подвижности всех ионов одинаковы, то биполярных структур у электродов не возникает. При более высоком напряжении от активного электрода распространяется положительно заряженная струйка ($t=15$ с, $U=1.5$ кВ), а от отрицательного встречная струйка, заряженная отрицательно. Поскольку положительная струйка более интенсивная, она сносит отрицательный заряд в заэлектродную область.

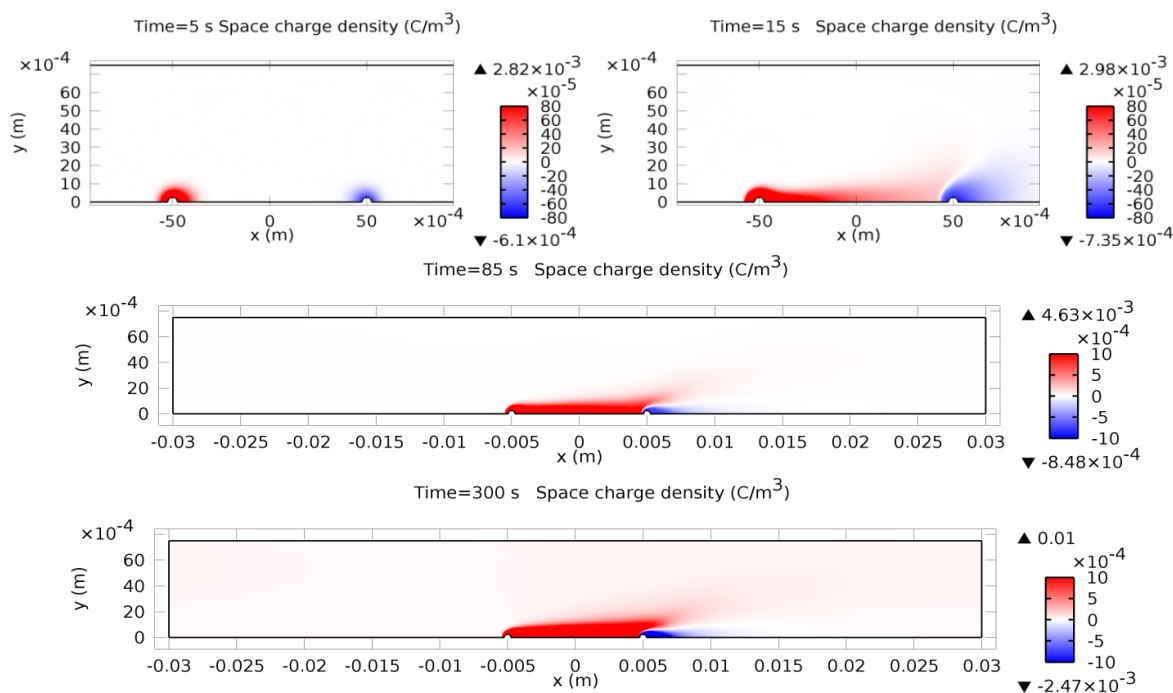


Рис.6.26..Распределение плотности объемного заряда.

В результате чего за отрицательным электродом формируется биполярная зарядовая структура ($t=85$ с, $U=8.5$ кВ), которая способствует формированию сквозного течения. Зарядовая структура в диапазоне напряжений 8.5 – 30 кВ практически не изменяется: от положительного электрода распространяется тонкая струйка положительного заряда, которая обтекает отрицательный электрод, за отрицательным электродом внутри положительной струйки распространяется более тонкая струйка отрицательного заряда. Этот режим следует считать режимом развитого сквозного ЭГД-течения. Также, как и в непроводящей жидкости в заэлектродной области имеется биполярно заряженная струйка. Однако в последнем случае рекомбинационный эффект сказывается уже в пределах межэлектродного промежутка. Далее приводятся распределения объемного заряда вдоль центральной струи при $U=2$ кВ и $U=30$ кВ (рис. 6.27.).

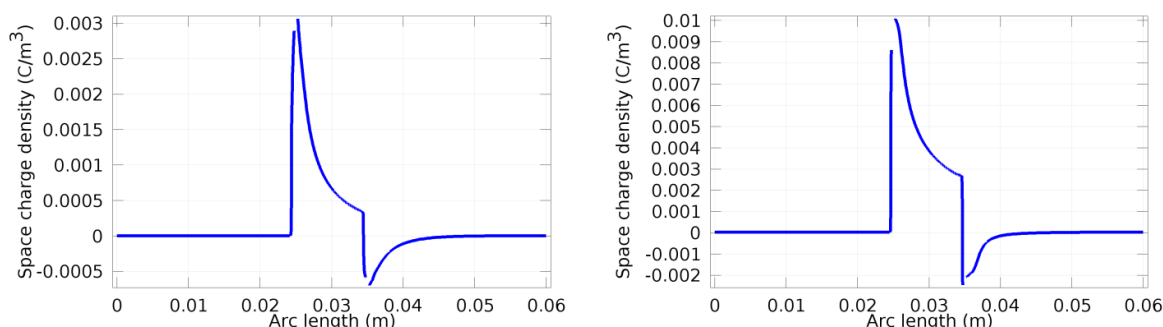


Рис. 6.27 Распределение объемного заряда вдоль плоскости симметрии при $U=2$ кВ (слева) и $U=30$ кВ (справа).

В канале вне межэлектродного промежутка плотность объемного заряда очень мала, у активного электрода наблюдается скачок плотности положительного заряда. На протяжении МЭП плотность заряда падает в несколько раз за счет рекомбинации с противоionsами. У отрицательного электрода знак заряда скачком изменяется на отрицательный. При напряжении на электродах 2 кВ на приведенной вольтамперной характеристике

возникает отклонение от линейности: на этом этапе происходит балансировка токов инжекции за счет объемного заряда и конвекции. Продольное распределение объемного заряда не зависит от напряжения, с изменением напряжения изменяется только величина плотности объемного заряда. При малом напряжении спад объемного заряда в МЭП происходит быстрее, чем при максимальном напряжении на электродах. В заэлектродной области плотность объемного заряда спадает практически до нуля примерно на расстоянии 1 см, поэтому в левой части канала плотность объемного заряда практически равна нулю.

Профильные графики поперечного распределения объемного заряда в МЭП слабо зависят от напряжения (рис. 6.28.). В середине межэлектродного промежутка в тонкой струе размером 0.2 см ($x=0$ см) сосредоточен положительный объемный заряд. Профиль распределения имеет Гауссов характер. За отрицательным электродом в струе размером 0.4 см ($x=1.2$ см) при малом напряжении (2 кВ) сосредоточен отрицательный объемный заряд. При максимальном напряжении профиль положительной струи практически не изменяется, однако плотность заряда в ней существенно выше, а профиль заряда за отрицательным электродом изменяется и приобретает биполярный характер: отрицательный объемный заряд сосредоточен в тонкой струе размером 0.1 см, прилегающей к оси симметрии, после отрицательного объемного заряда идет область положительного заряда. В результате рекомбинации противоположно заряженных ионов к правому концу канала плотность заряда уменьшается практически до нуля ($x=2.4$ см).

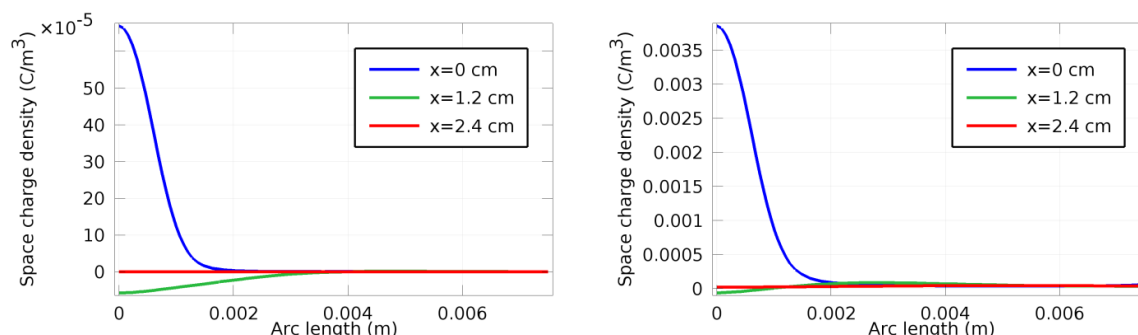


Рис. 6.28 Профильные графики распределения объемного заряда при $U=2$ кВ (слева) и $U=30$ кВ (справа).

Под действием Кулоновских сил, в канале формируется сквозное электрогидродинамическое течение инжекционного типа. В первые моменты времени ($t=5$ с, $U=0.45$ кВ) скорость течения мала, и течение сосредоточено около электродов. Реализуется т.н. режим неразвитого ЭГД-течения. Когда заряженная струя от положительного электрода достигает противоэлектрода ($t=15$ с, $U=1.5$ кВ), максимум скорости смещается в межэлектродный промежуток. По мере формирования течения жидкость во всем канале приходит в движение ($t=50$ с, $U=5$ кВ). В диапазоне напряжений 10-30 кВ (100-300 с) течение приобретает сквозной характер с характерными чертами развитого силового течения, описанного в начале главы. Линии тока сквозного течения взаимно параллельны и параллельны стенкам канала на большей части канала, за исключением межэлектродного промежутка. У положительного активного электрода линии тока сужаются, под острым углом к центральной плоскости канала, в этой области жидкость ускоряется Кулоновской силой вдоль центральной заряженной струйки течения. Это хорошо видно по продольному распределению скоростей: вдоль центральной плоскости расположена зона значительно повышенной скорости. До активного электрода скорость центральной струйки мала, за активным электродом жидкость ускоряется. В окрестности отрицательного электрода наблюдается мед-

ленное расширение линий тока, в этой области скорость течения плавно падает. Структура течения в этом диапазоне напряжений изменяется незначительно: с увеличением напряжения центральная силовая область течения несколько сужается. С ростом напряжения максимальная скорость течения и расход жидкости через канал возрастают.

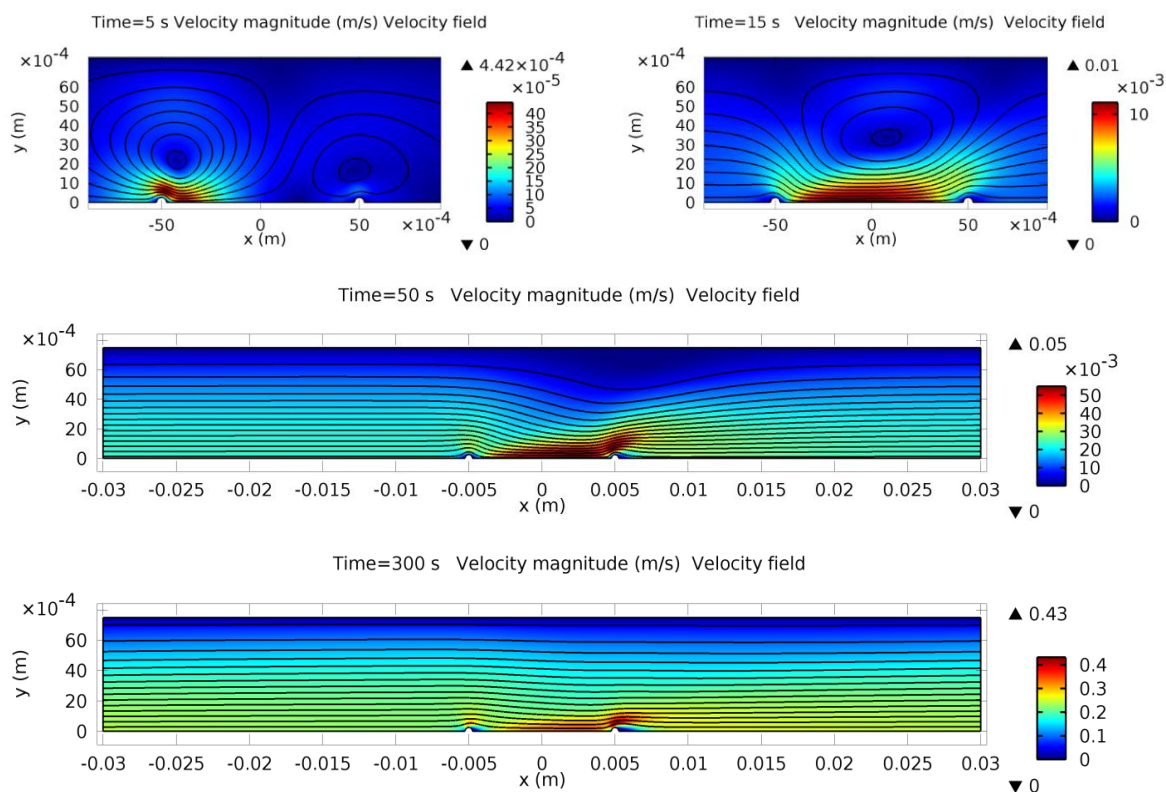


Рис. 6.29. Распределение скорости течения в канале при различных напряжениях.

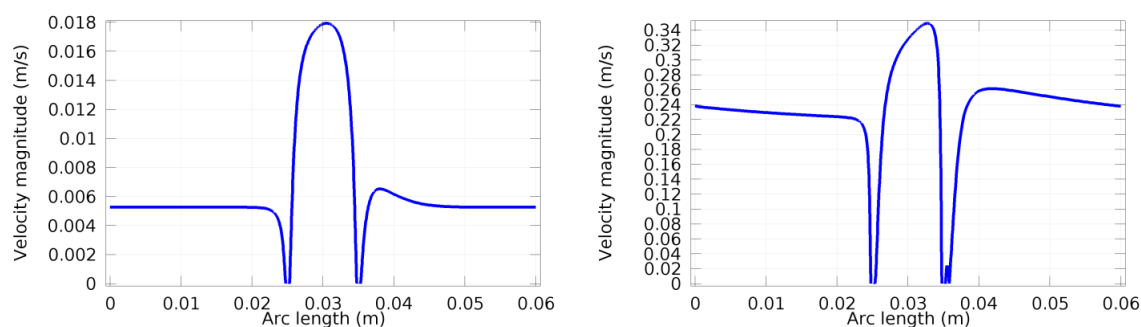


Рис. 6.30. Распределение скорости течения вдоль плоскости симметрии при $U=2$ кВ (слева) и $U=30$ кВ (справа).

Поскольку структура течения определяется центральной заряженной струйкой целесообразно более подробно рассмотреть продольное распределение скорости тонкой вдоль нее. (рис. 6.30.). При малом напряжении ($U=2$ кВ) скорость течения мала, ускорение жидкости происходит у положительного электрода, и максимум скорости находится примерно в середине МЭП. На рис. 6.31 приводятся профильные графики скорости в центральной струе ($x=0$) и за ее пределами при разных напряжениях. При малом напряжении силовое течение сосредоточено в пределах МЭП в тонкой центральной струе шириной в 0.4 см, в

остальной части канала скорость в несколько раз течения меньше, чем в центральной струе. Именно эта часть течения ускоряет жидкость в канале и создает сквозное течение.

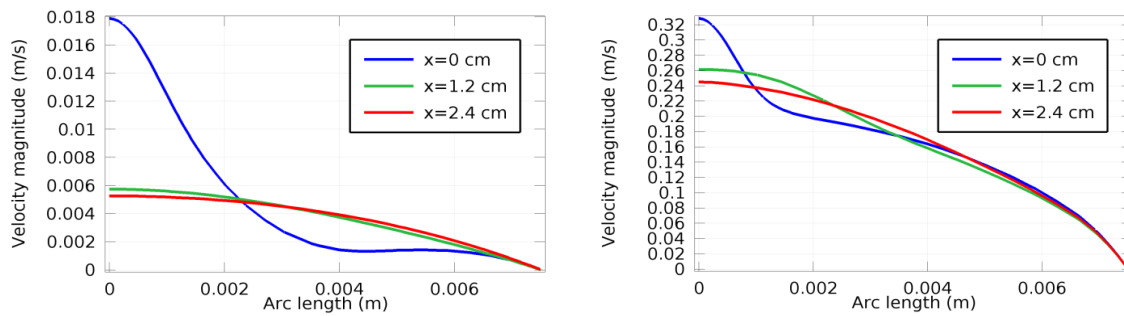


Рис. 6.31. Профильные графики распределения скорости течения при $U=2$ кВ (слева) и $U=30$ кВ (справа).

В межэлектродном промежутке профиль скорости соответствует силовому течению. За электродом профиль скорости изменяется и близко соответствует Пуазейлевскому..

На Рис.6.32 приведены продольные распределения плотности парциального заряда инжектированных ионов, плотности объемного заряда, и профильные графики распределения объемного заряда при напряжении 30 кВ. У активного электрода наблюдается скачок плотности инжектированного положительного заряда, вдоль центральной плоскости плотность инжектированных ионов быстро падает: в пределах МЭП плотность инжектированного положительного заряда падает в 3 раза. За пассивным электродом наблюдается скачок плотности инжектированного отрицательного заряда, затем в заэлектродной области – быстрый спад плотности отрицательного заряда на порядок на расстоянии в ~ 1 см, в остальной части канала заряд практически отсутствует (Рис.6.32 а). Распределения плотности объемного заряда в целом повторяют распределения плотности парциального заряда инжектированных ионов, однако значения несколько ниже. Видно, что объемный заряд практически исчезает на расстоянии 0,5 см за пассивным электродом. Судя по профилю заряда (Рис.6.32 б), инжектированные ионы сосредоточены в пределах центральной струйки с поперечными размерами порядка 2 мм. Далее по каналу плотность заряда существенно меньше, чем в МЭП, инжектированный заряд практически не возвращается по каналу к активному электроду. Эти процессы обусловлены рекомбинацией инжектированных ионов с диссоциированными ионами проводимости.

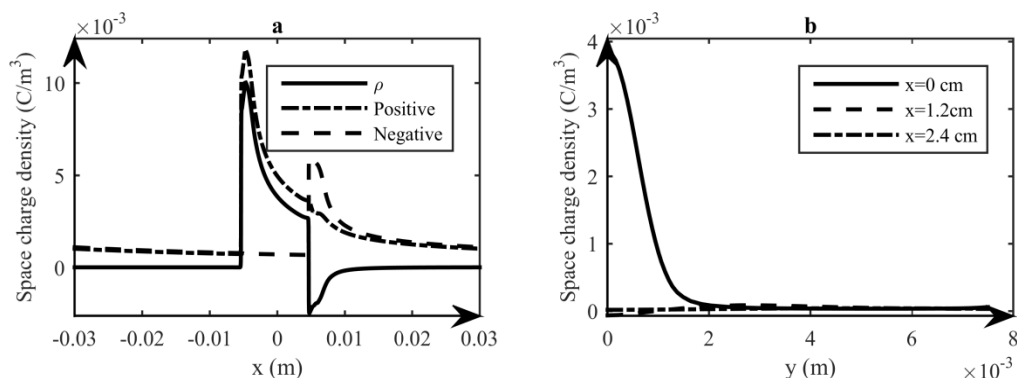


Рис. 6.32. Продольные распределения плотности парциальных зарядов, инжектированных положительной и отрицательной компонент и плотности объемного заряда(слева) и профили объемного заряда на различных расстояниях от середины МЭП.

Далее на рис. 6.33 приводятся интегральные характеристики сквозного ЭГД-течения в канале –зависимость расхода жидкости через правую границу от времени при разных токах инъекции. Видно, что с ростом напряжения расход жидкости линейно увеличива-

ется, а при уменьшении напряжения – уменьшается, причем прямые и обратные зависимости совпадают. Это свидетельствует об отсутствии остаточных процессов в канале при использованной скорости изменения напряжения 100 В/с. Поэтому можно считать, что при каждом напряжении процессы в межэлектродном промежутке и канале квазиустановившимися. При увеличении коэффициента при квадратичном слагаемом в выражении для тока инжекции на каждом из электродов в два раза зависимости расхода жидкости от напряжения становятся более крутыми, однако расход увеличивается непропорционально слабее, чем рост токов инжекции. Линейная зависимость расхода от напряжения соответствует участку насыщения на зависимости электрического Рейнольдса от напряжения.

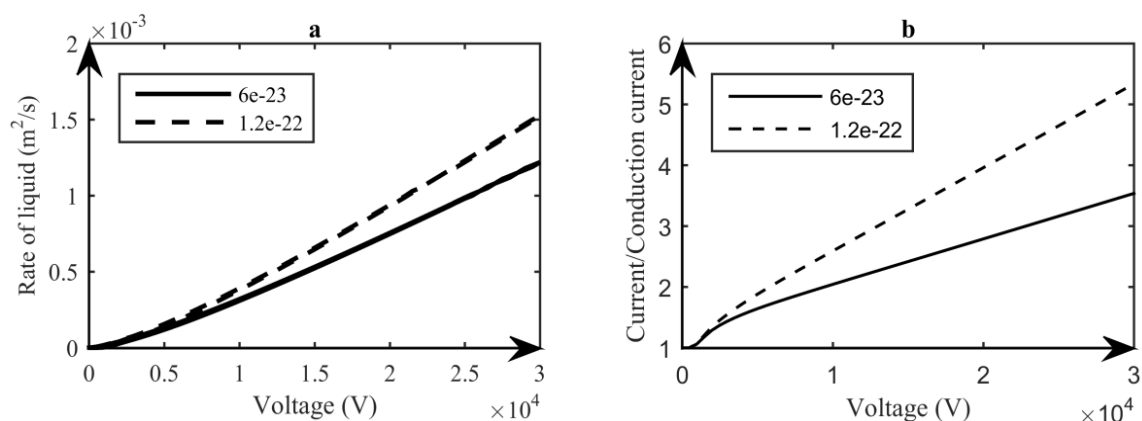


Рис. 6.33 Зависимость расхода от напряжения (слева), приведенная вольтамперная характеристика (справа) при двух коэффициентах зависимостей тока инжекции от напряжения.

На рис. 6.33 (b) представлены ДВАХ, построенные в приведенном виде, для двух уровней интенсивности инжекции, т.е. за единицу измерения тока выбран ток низковольтной проводимости. Вид приведенной ДВАХ имеет типовой характер: при малых напряжениях (<1 кВ) приведенный ток равен единице. Далее наблюдается высоковольтный участок быстрого роста приведенного тока, начиная с 3 кВ, приведенный ток линейно возрастет с напряжением. Это значит, что полный ток в симметричной системе электродов, расположенных в канале и работающих в режиме сквозного течения, также, как и в несимметричной системе электродов, расположенной в ограниченном объеме, квадратично растет с напряжением. По-видимому, на промежуточном нелинейном участке 1-3 кВ происходит балансировка токов инжекции с положительного и отрицательного электродов за счет объемного заряда. При увеличении токов инжекции (коэффициента при квадратичном слагаемом в два раза) полный ток, протекающий в системе, также увеличивается, однако увеличение наклона линейной зависимости тока от напряжения несколько ниже: всего 1.8 раза. Таким образом интегральные зависимости для симметричной системы электродов, работающей в режиме биполярной инжекции в замкнутом длинном канале качественно подобны при различных уровнях инжекции. В целом интегральные характеристики сквозного ЭГД-течения в канале в условиях биполярной инжекции качественно соответствуют аналогичным характеристикам, полученным для течений в несимметричных системах электродов.

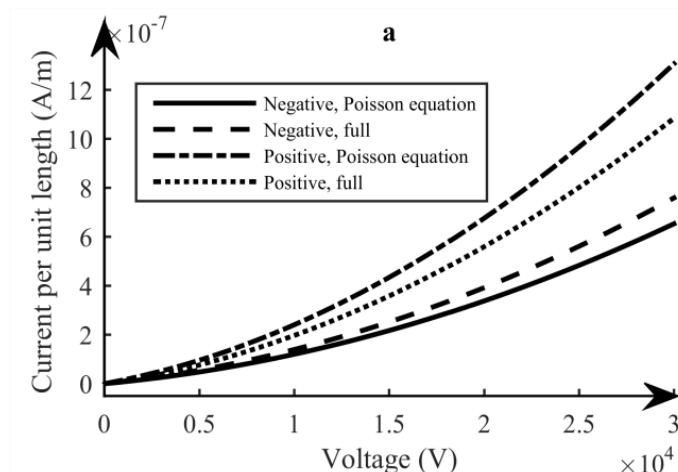


Рис. 6. 34. Зависимости начальных и установившихся токов инжекции на положительном и отрицательном электродах от напряжения.

Плотности токов инжекции на электродах задавались в виде квадратичного полинома от локальной напряженности электрического поля. Изначально плотность тока инжекции на левом активном электроде была в два раза больше тока инжекции на правом пассивном электроде. На графике рис. 6.34 приводятся зависимости токов инжекции от напряжения в электростатическом приближении без учета влияния объемного заряда и течения на процесс инжекции ионов с электродов и с учетом этого влияния. В электростатическом приближении соотношение токов инжекции при достижении максимального значения напряжения равно 2:1. В процессе формирования течения происходит изменение начальных зависимостей за счет объемного заряда, инжектируемого с электродов. У положительного активного электрода формируется избыток концентрации положительных инжектированных ионов. У отрицательного пассивного электрода концентрация положительных ионов растет, повышая приэлектродную напряженность поля, поэтому плотность тока инжекции с активного электрода уменьшается, а плотность тока инжекции с пассивного электрода – увеличивается. В связи с этим результирующие зависимости плотности токов инжекции с положительного и отрицательного электродов сближаются (см. Рис. 6.35 пунктирные кривые), а результирующее соотношение плотности токов инжекции при напряжении 30 кВ понижается до 1.5:1.

Заключение.

Исследован процесс формирования и структура сквозного ЭГД-течения от электродов провод-провод, расположенных в замкнутом в канале в режиме линейного роста напряжения в диапазоне 0-30 кВ при соотношении начальных токов инжекции на положительном и отрицательном электродах 2:1.

Четырех ионная модель позволяет напрямую анализировать процессы рекомбинации инжектированных ионов, а также анализировать наличие остаточного заряда в канале и его влияние на электрофизические и скоростные характеристики сквозного течения.

Инжекционные токи на электродах под влиянием объемного заряда ведут себя по-разному: ток инжекции с активного электрода спадает, ток инжекции с пассивного электрода возрастает. В процессе установления сквозного ЭГД-течения в канале происходит балансировка токов инжекции на электродах.

В установившемся режиме структура центральной струи развитого сквозного ЭГД течения в межэлектродном промежутке соответствует силовому течению, а на большей

остальной части канала соответствует вязко-диссипативному течению с профилем близким к Пуазейлевскому.

Зарядовая структура центральной струи сквозного ЭГД-течения в канале имеет типовую структуру: тонкая заряженная струйка в межэлектродном промежутке и биполярный вафлеобразный шлейф за пассивным электродом.

Вольтамперная характеристика системы носит квадратичный характер, а зависимость расхода от напряжения линейна.

Влияние величины низковольтной проводимости на структуру сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале.

ЭГД-течение инжекционного типа, существенно зависит от низковольтной проводимости жидкости из-за формирования неравновесных диссоционно-рекомбинационных слоев, препятствующих проникновению инжестируемого заряда в жидкость. Рассмотрим влияние величины низковольтной проводимости на структуру сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале. Будет рассматриваться процесс формирования и развития электрогидродинамического течения в замкнутом канале при включении постоянного напряжения ± 10 кВ и собственной проводимости диэлектрической жидкости $0,3$ пСм/м, т.е. собственная проводимость диэлектрической жидкости в 10 раз выше проводимости, которая была в предыдущих задачах. В диэлектрической жидкости с более высокой проводимостью ЭГД-течение может не возникнуть, поскольку потоки инжестируемых ионов могут быть подавлены встречными потоками диссоциированных ионов, которые рекомбинируют между собой, а у электродов образуются диссоциационно-рекомбинационные слои (см. главу 3 и 5). Для того чтобы токи инъекции с электродов преодолели приэлектродный барьер, их необходимо увеличить пропорционально увеличению проводимости жидкости. В связи с этим токи инъекции также были увеличены в 10 раз. Начальный ток инъекции с активного электрода, как и ранее в два раза больше начального тока инъекции с пассивного электрода.

Далее приводятся результаты решения: распределения концентрации различных сортов ионов в последовательные моменты времени после включения напряжения 10 кВ. Распределение концентрации инжестируемых ионов в рассматриваемом случае (см. рис. 6.37.) отличается от аналогичного распределения в случае меньшей проводимости. На начальных этапах (0.003 с) у электродов формируются кольцевые приэлектродные ионизационно-рекомбинационные слои. Толщина слоев существенно меньше, чем в жидкости пониженной проводимости из-за рекомбинации с диссоциированными ионами. В момент времени 0.01 сот положительного электрода распространяется тонкая струя положительных инжестируемых ионов. Противоположно заряженные струи, текущие от противoelectродов, встречаются ближе к центру межэлектродного промежутка ($t=0.04$ с). Далее противоположно заряженные струи распространяются параллельно друг другу в направлении, перпендикулярном плоскости симметрии ($t=0.1$ с). Через некоторый промежуток времени более интенсивная струйка положительных ионов сносит встречную струйку отрицательных ионов ($t=0.45$ с). К моменту времени $t=0.57$ струйка положительных инжестируемых ионов достигла противoelectрода, а струйка отрицательных ионов снесена в заэлектродную область. Когда собственная проводимость жидкости была в 10 раз меньше, положительные инжестируемые ионы возвращались по замкнутому каналу к активному электроду, в данной же задаче положительные ионы не проникают в левую часть канала и

не возвращаются к активному электроду вследствие более интенсивной рекомбинации. Толщина струйки инжестрированных ионов значительно меньше, чем в жидкости пониженной проводимости.

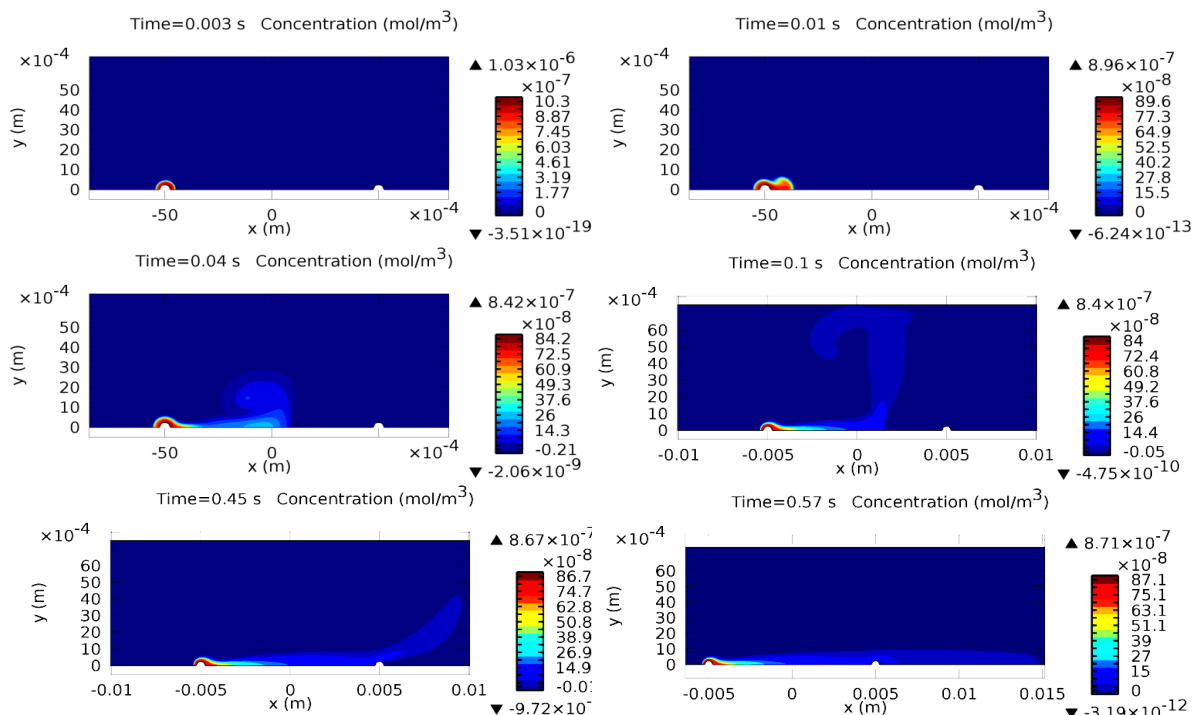


Рис.6.37. Распределение концентрации инжестрированных положительных ионов.

Распределение концентрации инжестрированных отрицательных в первые моменты времени аналогично распределению положительных инжестрированных ионов, отличается только направление распространения заряженной струи (рис. 6.38). Когда противоположно заряженные струйки встречаются, струйка отрицательных ионов сносится положительно заряженной струйкой в заэлектродную область. Отрицательные инжестрированные ионы также не проникают в левую часть канала из-за быстрой рекомбинации с ионами противоположного знака. Далее приводится распределение концентрации инжестрированных ионов вдоль центральной струи и зависимости плотности токов инжестции от времени (рис. 6.39), в жидкости увеличенной проводимости концентрация положительных и отрицательных инжестрированных ионов имеют, как и раньше максимумы у положительного и отрицательного электродов соответственно, однако продольное уменьшение концентрации происходит быстрее, чем в случае пониженной проводимости. За отрицательным электродом наблюдается максимум концентрации отрицательных инжестрированных ионов, который также быстро спадает вдоль течения из-за того, что отрицательные инжестрированные ионы рекомбинируют с диссоциированными и инжестрированными ионами противоположного знака. Как видно из рис. 6.39 изначально, плотность тока инжестции с положительного электрода была в два раза больше плотности тока инжестции с отрицательного электрода, то есть соотношение плотности токов инжестции было 2:1. В результате инжестции в жидкости появляется объемный заряд, который приводит к тому, что плотность тока

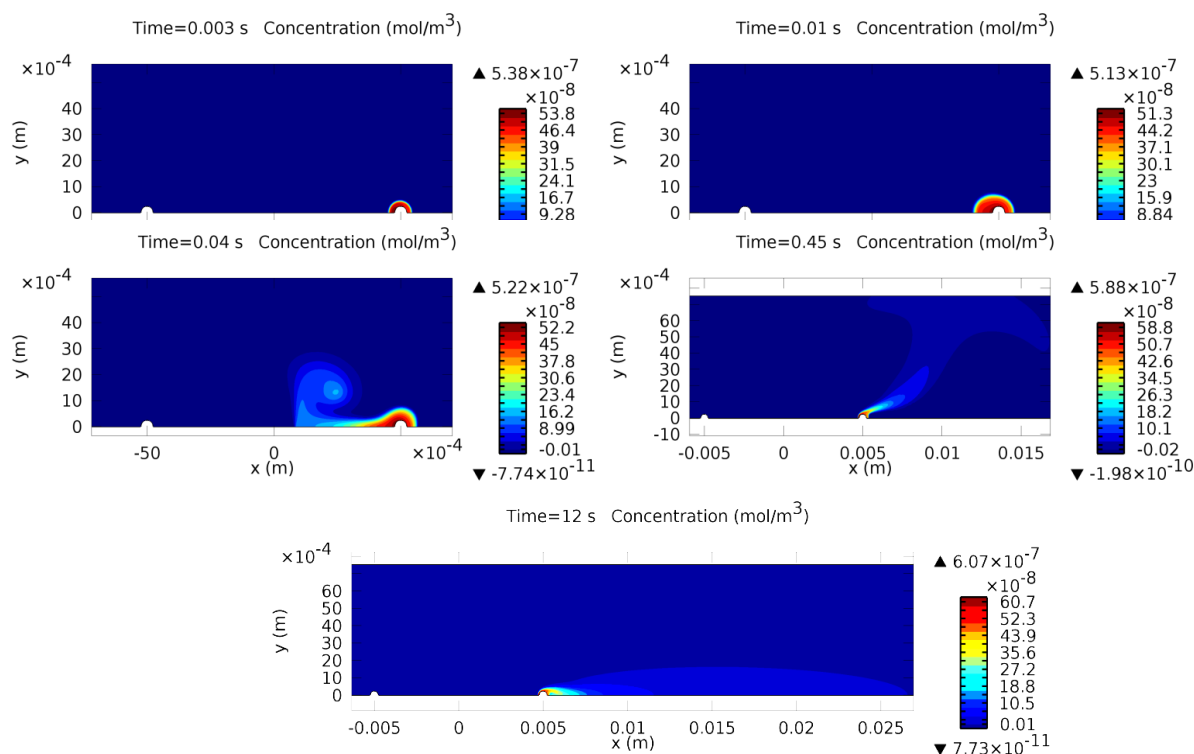


Рис. 6.38. Распределение концентрации инжектированных отрицательных ионов в канале.

инъекции с положительного электрода уменьшается, а с отрицательного электрода – увеличивается, и отношение плотности токов инъекции снижается до 1.2:1 (рис. 6.39, справа). Релаксация токов происходит за более короткое время, чем в менее проводящей жидкости: время порядка 1 с, далее процесс выходит на стационар.

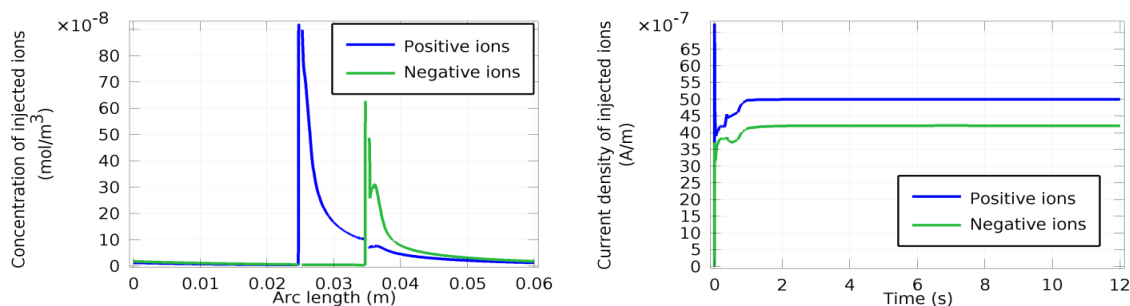


Рис. 6.39. Распределение концентрации инжектированных ионов (слева) и токов инъекции (справа).

Поскольку в канале появляется избыток инжектированных ионов, в нем появляется не скомпенсированный объемный заряд (рис. 6.40). В первые моменты времени у каждого из электродов формируются кольцевые слои гомозаряда. Толщина слоев меньше, чем в жидкости с проводимостью 10 пСм/м. Далее из слоев возникают тонкие встречные струйки. Положительно заряженная струйка более интенсивная, поэтому после встречи струй в середине межэлектродного промежутка, происходит снос отрицательно заряженной струйки в заэлектродную область. В заэлектродной области формируется продолжение центральной струи, имеющее двухслойную биполярную структуру. Однако в отличие от жидкости пониженной проводимости в ней преобладает отрицательный объемный заряд.

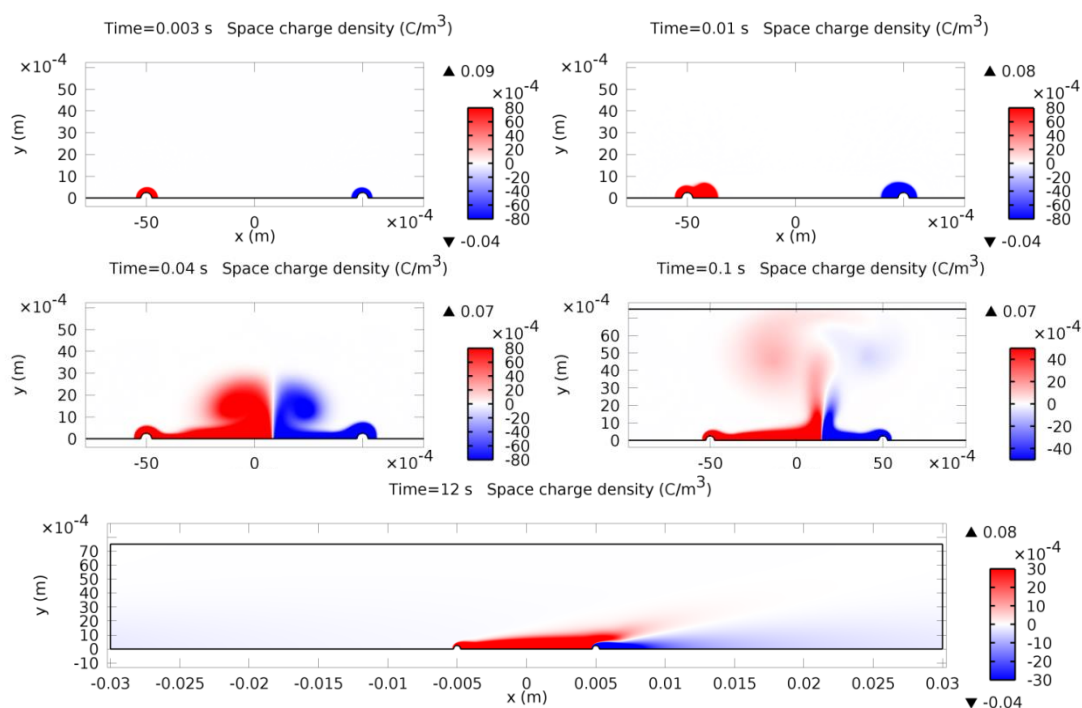


Рис.6.40 Распределение плотности объемного заряда в канале.

Далее приводится распределение скорости течения в канал (рис. 6.41.). С момента включения напряжения ЭГД-течение начинает формироваться в виде двух встречных микровихрей у обоих электродов. Далее от электродов распространяется два противоположно направленные струйки, которые встречаются в середине межэлектродного промежутка и движутся в направлении диэлектрической стенки, формируется четырех ячейное течение. Со временем, через 0,6 секунды, струя от положительного электрода сносит противоположную струю в заэлектродную область, и жидкость во всем канале приходит в однонаправленное движение. Замкнутые ячейки, которые были сформированы встречными потоками, теперь образуют внутренние вихри в заэлектродной области. Внутренние вихри тормозят сквозную прокачку, но со временем они исчезают, и в канале формируется ламинарное сквозное ЭГД-течение без внутренних вихрей. Распределение скорости в канале, однородно, за исключением области центральной струи, к которой жидкость ускоряется электрическим полем.

Далее приводятся ампер секундные характеристики системы, т.е. зависимости различных компонент плотности тока, плотности полного тока и расхода жидкости от времени (рис. 6.42.). Суммарная плотность тока инжектированных положительных и отрицательных ионов сначала быстро возрастает, поскольку концентрация инжектированных ионов в канале со временем увеличивается за счет инъекции с электродов. Далее наблюдается некоторое немонотонное изменение плотности тока инжектированных ионов, которое связано с изменением зарядовой структуры, после чего плотность суммарного тока инжектированных ионов выходит на стационарное значение. Ток диссоциированных ионов сначала уменьшается, так как вследствие рекомбинации полная концентрация диссоциированных ионов уменьшается, после чего выходит на стационарное значение. Полный ток через жидкость складывается из тока инъекции и тока диссоциированных ионов.

Вклад тока диссоциированных ионов невелик, поэтому зависимость плотности полного тока от времени аналогична зависимости плотности тока инжектированных ионов.

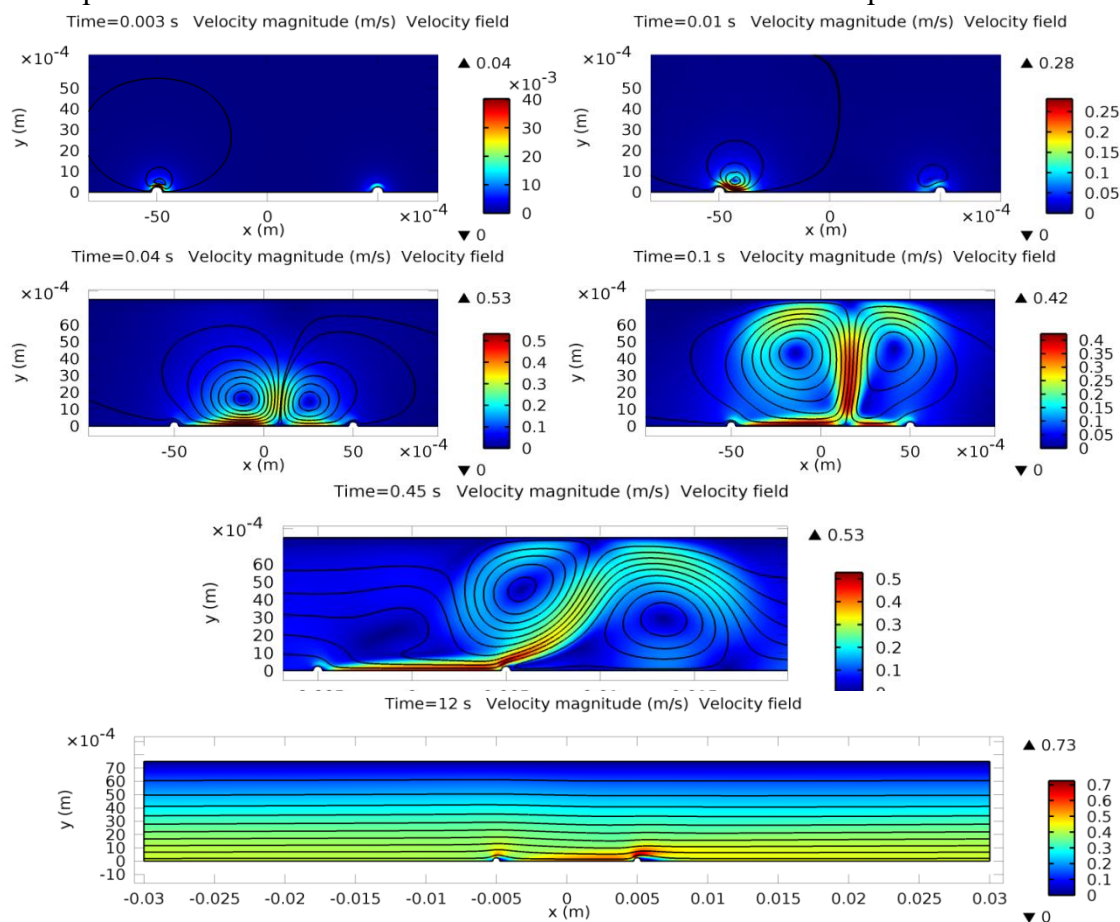


Рис. 6.41 Распределение скорости течения в канале в различные моменты времени после включения напряжения.

По мере формирования сквозного течения расход через канал плавно возрастает и выходит на стационарное значение за 4 секунды (см. рис. 6.42). Формирование установившегося течения в жидкости повышенной проводимости идет быстрее, чем в жидкости с меньшей проводимостью. Время установления сквозного течения порядка 4 с.

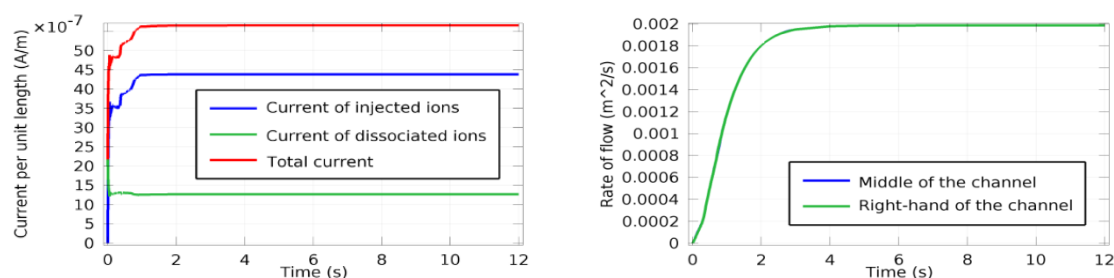


Рис. 6.42. Зависимость разных компонент тока и полного тока от времени (слева) и расхода жидкости через правую часть канала от времени (справа).

На рис. 6.43. приведены линейные распределения скорости вдоль центральной струи сквозного течения. Как видно из рис. 6.43. основное ускорение центральной заряженной струйки жидкости происходит у активного положительного электрода и далее в пределах межэлектродного промежутка, однако за отрицательным электродом наблюдается небольшой локальный максимум ускорения. Появление этого локального максимума

связано с изменением структуры приэлектродного заряженного слоя и наличием отрицательного следа в заэлектродной области. Также на рис. 6.43. (слева) приводятся профильные графики скорости в разных сечениях канала В середине межэлектродного промежутка в пределах центральной струйки толщиной менее 1 мм наблюдается гауссов профиль, характерный для силового течения, а далее в не межэлектродного промежутка формируется профиль близкий к Пуазейлевскому. В заэлектродной области полный профиль скорости плавно переходит к Пуазейлевскому. Таким образом в жидкости повышенной проводимости основные черты развитого сквозного ЭГД-течения сохраняются, однако зарядовая структура центральной струи течения изменяется: основная заряженная струйка становится тоньше, плотность заряда быстрее падает вдоль течения, время установления течения уменьшается. Быстрее рекомбинирует инжектированный заряд, становится тоньше центральная струя течения.

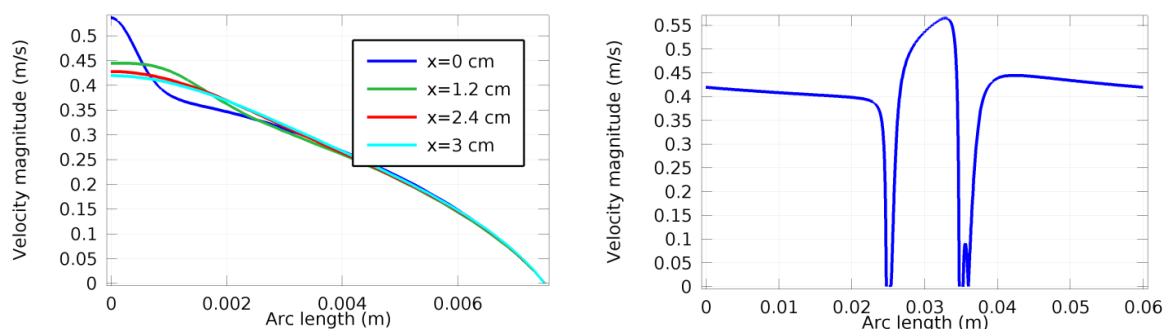


Рис. 6.43. Распределение скорости течения вдоль плоскости симметрии (слева) и профильные графики скорости (справа).

Сравнение результатов экспериментального исследования и компьютерного моделирования [6.9,6.10].

Сравним результаты экспериментального исследования ЭГД-течений в симметричной системе электродов с результатами компьютерного моделирования. На рис.6.44 приведены распределения скоростей в центральной струе сквозного ЭГД-течения в канале полученные в эксперименте в 8%-ном растворе бутанола в ПМС, низковольтная проводимость жидкости 0,2нСм/м. Внизу приведены результаты компьютерного моделирования течения в жидкости с аналогичными характеристиками и низковольтной проводимостью порядка 0,2нСм/м. Судя по распределению скоростей и линий тока ЭГД- течения как в эксперименте, так и в модели носят сквозной характер: узкая центральная струя, пересекающая межэлектродный промежуток ,имеющая длинную первичную зону разгона с максимумом скорости недалеко от пассивного электрода и вторичную зону разгона за пассивным электродом. Встречных течений от пассивного электрода нет. Подобная структура возникает в условиях, когда плотность тока инжекции с одного из электродов в несколько раз выше, чем с другого, что обеспечивается, введением в жидкость электроноакцепторной примеси-бутанола. Второе условие относительно низкая низковольтная проводимость жидкости, когда рекомбинационный эффект невелик и заряд, инжектируемый с активного электрода, доносится до противоиэлектрода. В этих условиях основная центральная струя, текущая от активного электрода, сносит встречную в заэлектродный промежуток, образуя за пассивным электродом биполярно-заряженную вафлеобразную структуру, в которой происходит рекомбинация противоположно-заряженных ионов.

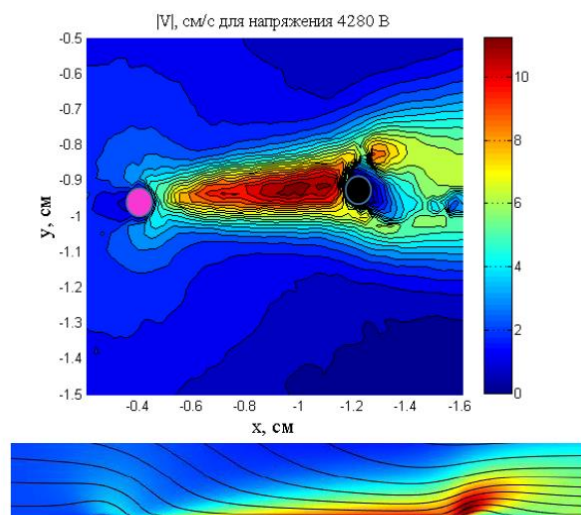


Рис. 6.44. Распределения скоростей сквозного ЭГД-течения в канале, полученные в эксперименте в 8%-ном растворе бутанола в ПМС, низковольтная проводимость жидкости 0,2нСм/м (сверху), результаты моделирования (внизу).

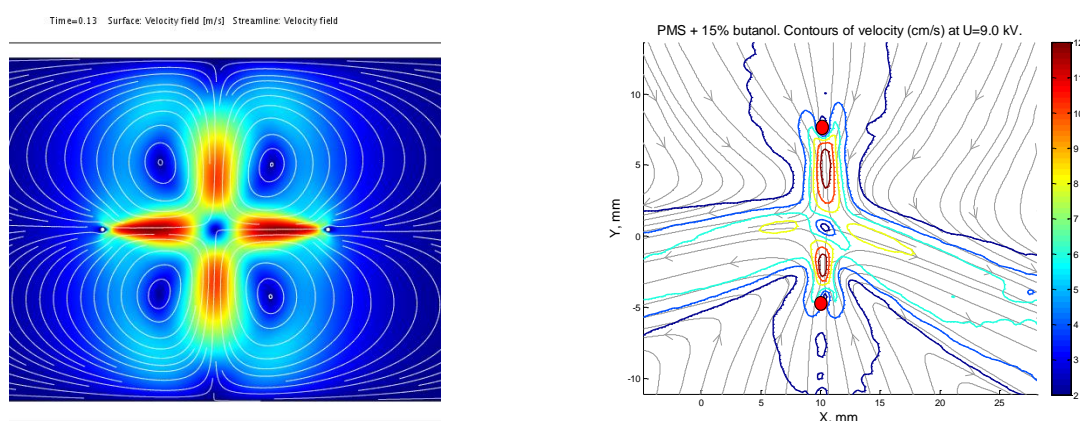


Рис. 6.45. Сравнение результатов компьютерного моделирования(слева) и эксперимента(справа)

На рис. 6.45. приведены распределения скоростей ЭГД-течений в системе электродов провод-провод: слева- эксперимент, справа компьютерное моделирование в жидкость-раствор бутанола (14%) в полиметилсилоксане, соотношение уровней инжекции на электродах 2:1, проводимость жидкости 4нСм/м. Как видим повышение концентрации бутанола, приводящее к повышению уровня низковольтной проводимости, существенно изменило картину ЭГД-течений в той-же геометрии электродов. Режим сквозного течения изменился на режим встречных ЭГД-течений. Это изменение связано с сильным рекомбинационным эффектом, под действием которого плотность объемного заряда в центральной струе быстро падает в продольном направлении, и заряженная струйка не доходит до противоэлектрода, а тормозится, в седине межэлектродного промежутка. Поэтому встречная струйка от пассивного электрода не сносится в заэлектродную область, а развивается навстречу, образуя в межэлектродном промежутке четырех ячеистую структуру с длинными боковыми струями.

Таким образом результаты компьютерного моделирования качественно соответствуют результатам натурного эксперимента.

Выводы:

1. Компьютерное моделирование позволило впервые описать процесс формирования и зарядовую структуру центральной струи ЭГД-течений в условиях биполярной инжекции с геометрически идентичных электродов и проследить динамику ее изменения в широком диапазоне напряжений, а также влияние интенсивности инжекции и низковольтной проводимости на зарядовую структуру центральной струи.
2. Четырех ионная модель наиболее полно описывает ЭГД-течение в канале. Моделирование показало, что результаты, полученные в четырех ионной модели, согласуются с ранее полученными результатами в двух ионной постановке. Но четырех ионная модель позволяет получить распределения различных сортов ионов в отдельности и напрямую анализировать процессы рекомбинации инжектированных ионов.
3. При соотношении токов инжекции 1:1 в замкнутом канале от двух разно полярных электродов одинакового сечения формируются две встречные электрогидродинамические струи, образующих четыре замкнутые ячейки в межэлектродном промежутке. Это случай симметричного ЭГД-течения с выраженной зоной рекомбинации, лежащей в середине МЭП. (Фотография см. рис. 4.28)
4. Исследован процесс установления и структура центральной струи сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале при соотношении начальных токов инжекции 2:1 и 3:1. Модель позволяет напрямую исследовать остаточный заряд жидкости в канале и его влияние на электрофизические и скоростные характеристики сквозного течения. Четырех ионная модель ЭГД-течения в замкнутом канале позволяет подбирать сбалансированные функции инжекции на электродах, благодаря чему можно минимизировать остаточный заряд, циркулирующий в канале.
5. Описаны этапы процесса установления сквозного ЭГД-течения в канале. Инжекционные токи на электродах в процессе установления течения ведут себя по-разному: ток инжекции с активного электрода спадает, ток инжекции с пассивного электрода возрастает. Инжектированные ионы рекомбинируют в основном с диссоциированными ионами противоположного знака, в заэлектродной области – с отрицательными инжектированными и диссоциированными ионами.
6. В установившемся режиме структура центральной струи развитого сквозного ЭГД-течения в межэлектродном промежутке соответствует силовому течению, а на остальной части канала соответствует вязко-диссипативному течению с Пуазейлевским профилем. Расход жидкости в различных частях канала в установившемся режиме одинаков, течение ламинарно. Время установления ЭГД-течения в замкнутом канале в жидкости с низковольтной проводимостью 30 пСм/м составляет 10 с, а с проводимостью 300 пСм/м порядка 4 с. Фотография рис. 4.28.
7. Повышение собственной проводимости жидкости изменяет структуру центральной струи сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале. При увеличении собственной проводимости жидкости от $3 \cdot 10^{-11}$ Сим/м до $3 \cdot 10^{-10}$ Сим/м уменьшаются размеры приэлектродных слоев, поэтому уменьшается толщина струи инжектированных ионов. Время установления течения в канале изменяется от 10 с до 4 с. При проводимости $3 \cdot 10^{-10}$ См/м инжектированные ионы рекомбинируют с ионами проводимости быстрее, чем в случае пониженной проводимости, поэтому объемный заряд быстро рекомбинирует за пассивным электродом.

8. При разных подвижностях инжектированных ионов изменяется структура приэлектродных слоев, плотность заряда в приэлектродных слоях повышается, а слои имеют биполярную структуру. В первые моменты времени от электродов формируется несколько заряженных струй, направленных в разные стороны. Расход жидкости при разных подвижностях различных сортов ионов больше расхода жидкости при одинаковых подвижностях ионов на 13 %.
9. Исследован процесс формирования и структура сквозного ЭГД-течения в замкнутом канале от электродов провод-провод при напряжении, изменяющемся линейно в диапазоне 0-30 кВ, при начальном соотношении токов инжекции 2:1. В диапазоне напряжений 4-10 кВ происходит формирование развитого сквозного ЭГД-течения. Структура центральной струи сформировавшегося сквозного ЭГД-течения сохраняется, в диапазоне напряжений: 10-30 кВ. Высоковольтный участок вольтамперной характеристики системы носит квадратичный характер, а зависимость расхода от напряжения линейна. В безразмерном виде, также, как и для ЭГД-течений в ограниченных объемах, электрическое число Рейнольдса постоянно, а приведенный ток линейно зависит от напряжения. Расход жидкости и полный ток в системе изменяются непропорционально изменению плотности токов инжекции.
10. Сквозное течение формируется только в жидкостях с невысоким уровнем низковольтной проводимости до 0,1 нСм/м. При инжекции в жидкость с повышенным уровнем низковольтной проводимости инжектированный заряд перестает проникать в объем жидкости, из-за возникновения приэлектродных рекомбинационных слоев, что приводит к вырождению режима сквозного течения.
11. В жидкостях с повышенным уровнем низковольтной проводимости встречные ЭГД-течения могут быть обусловлены эффектом Вина.
12. Результаты компьютерного моделирования ЭГД-течений в системе электродов провод-провод близко соответствуют результатам экспериментальных исследований структурных особенностей ЭГД-течений в условиях биполярной инжекции

Литература к главе 6

- 6.1 Стишков Ю.К, Остапенко А.А, Чистяков Н.А. ЭГД течения в системе взаимно параллельных проволок. Магнитная гидродинамика. 1982, (3), 79–82.
- 6.2 Буянов А.В., Стишков Ю.К. Особенности структуры сквозного электрогидродинамического течения// Журнал технической физики. – М: Журнал технической физики, 2004 г. – 8: Т. 74.
- 6.3 Елагин И.А, Стишков Ю.К. Особенности формирования центральной струи эгд-течения в системе электродов провод-плоскость // Сборник трудов IX Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2009. – С. 164-168.
- 6.4 P.V. Glushchenko, Y. K. Stishkov. EHD flow in symmetric wire-wire electrode system // Dielectric Liquids (ICDL), 2008 IEEE International Conference on – Poitiers (France), – 2008. – P. 94-96.
- 6.5 Елагин И.А, Стишков Ю.К. / Зона рекомбинации ЭГДтечений в системе провод-провод. // Сборник трудов IX Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" –СПб: СПбГУ, 2006.

- 6.6 Elagin I.A., Stishkov Yu. K. Proceedings of the 5th International EHD workshop // Computer Simulation of Electrohydrodynamic Flow Formation Process using a Finite Element Method. –France : UFR, 2004.
- 6.7 Ландау Л. Д. Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. – М : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – Т. 6 : 736 стр.
- 6.8 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Моделирование сквозного ЭГД течения в симметричной системе электродов на основании полной системы уравнений ЭГД // Сборник трудов IX Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей» – г. Санкт-Петербург, – 2009. – С. 169-173.
- 6.9 I.A. Ashikhmin and Yu. K. Stishkov. Structural features of ehd flows in wire-wire symmetric systems of electrodes // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. –Kishinyov : Allerton Press, Inc. distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC, 2009 г.. –6 : Т. 45. –Issn: 1068-3755.
- 6.10 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Моделирование динамической вольтамперной характеристики в симметричной системе электродов в канале с низкопроводящей жидкостью // Сборник докладов X-ой Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей" – г. Санкт-Петербург, – 2012. – С. 3-7.
- 6.11 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Электрогидродинамические преобразователи инжекционного типа // электронная обработка материалов, 2012. – Т. 48, – № 3. – С. 93-101.
- 6.12 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Влияние стенок из изолирующего материала на структуру электродинамических течений в канале // Журнал технической физики, 2012. – Т. 82, – № 9. – С. 1-7.
- 6.13 Stishkov, Y.K., Ashikhmin, I.A. Simulation of EHD flows in a symmetric two wire electrode system at different values of low-voltage conductivity // Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids, ICDL 2014, 2014.
- 6.14 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. IPCMF 14 // Исследование ЭГД-турбулизации сквозного течения в симметричной системе электродов. – Плес: ИГЭУ, 2010, с.341-346.
- 6.15 Стишков Ю.К., Закирьянова Р.Э. Исследование электрогидродинамического течения в симметричной системе электродов методом динамических вольтамперных характеристик, Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 4. С. 507-513.

ГЛАВА 7. ЭГД-ТЕЧЕНИЯ ОБУСЛОВЛЕННОЕ ДИССОЦИАЦИЕЙ В ЗАКРЫТЫХ ОБЪЕМАХ

В главах 4-6 показано, что с увеличением низковольтной проводимости жидкости ионы, инжектируемые с электродов, все труднее попадают в жидкость, т.к. они рекомбинируют с ионами проводимости в тонком приэлектродном слое [7.1]. Показано также, что увеличение концентрации примеси, стимулирующей инжекцию, вызывает рост инжекционного тока только в ограниченном диапазоне концентраций, а далее увеличение концентрации примеси перестает увеличивать инжекционный ток. Поэтому инжекционный эффект существенно ослабевает в жидкостях повышенной проводимости. В этих условиях единственным механизмом, вызывающим ЭГД-течения остается эффект Вина. [7.2]. ЭГД-течения обусловленное диссоциацией реализуются обычно в сильно неоднородных полях с электродами типа игла (лезвие) над плоскостью. Эти течения исследованы значительно хуже, чем течения инжекционного типа. ЭГД-течения в таких системах направлены от иглы (лезвия) к плоскости и также, как и течения инжекционного типа имеют зонную структуру. Структура течений, обусловленных эффектом Вина аналогична течения инжекционного типа, т.к. максимум напряженности поля, а, следовательно, максимум интенсивности диссоциации лежит под кончиком иглы. Различия между двумя механизмами зарядообразования заключается в том, что инжекционный механизм является поверхностным, а диссоционный – объемным. Поэтому целесообразно проанализировать структуру ЭГД-течений, обусловленных эффектом Вина в различных условиях. В настоящей главе [7.4], сначала рассматривается система лезвие-плоскость, в которой часто исследуются и анализируются течения инжекционного типа; далее описываются результаты для трубчатого электрода. Трубку можно представить, как лезвие, свернутое в отрезок трубы. Если величина межэлектродного промежутка (МЭП) меньше радиуса трубки, то ЭГД-течение будет иметь ту же структуру, что и от лезвия. Интерес представляет случай, когда радиус трубки меньше величины МЭП. В этом случае в структуре течения появляются нетипичные особенности, рассмотренные далее. Более того, если трубчатый электрод слабо выступает из диэлектрической стенки, структура течения полностью меняется. Далее рассмотрены оригинальные случаи, когда область повышенной напряженности расположена вдали от электродов. Это реализовано в системах с диэлектрическим барьером, имеющим отверстие, либо заточенным в виде т.н. диэлектрического лезвия. В последнем случае течение схоже с течением от трубчатого электрода, слабо выступающего из отверстия и причины такого сходства, будут проанализированы. Исследование проведено методом компьютерного моделирования. Вычисления производились при помощи программного обеспечения COMSOL Multiphysics Инжекция в исследованиях не учитывалась, поэтому исследовалась двух ионная модель, ионы возникали благодаря диссоциации примесных молекул. Решалась полная система уравнений электрогидродинамики [7.2]:

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \rho / (\varepsilon \varepsilon_0) \quad (7.1)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \text{div}(\vec{j}_i) = W_0 F(p) - a_r n_i n_2 \quad (7.3)$$

$$W_0 = a_r (\sigma_0 / (eb_1 + eb_2))^2 \quad (7.4)$$

$$a_r = e(b_1 + b_2) / (\varepsilon \varepsilon_0) \quad (7.5)$$

$$\vec{j}_i = \text{sign}(Z_i) n_i b_i \vec{E} - D_i \nabla n_i + n_i \vec{u} \quad (7.6)$$

$$\rho = e(n_1 - n_2) \quad (7.7)$$

$$\gamma \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \gamma(\vec{u}, \nabla) \vec{u} = -\nabla P + \eta \Delta \vec{u} + \rho \vec{E} \quad (7.8)$$

$$\text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (7.9)$$

$$F(p) = I_1(4p) / (2p) \quad (7.10)$$

$$p = e^2 / (2k_B T) \sqrt{E / (4\pi \varepsilon \varepsilon_0 e)} \quad (7.11)$$

где E – напряжённость электрического поля, ρ – плотность объёмного заряда, ε – относительная диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная, ϕ – электрический потенциал, n – концентрация ионов, индекс i нумерует сорта частиц, t – время, j – плотность потока частиц, W_0 – интенсивность диссоциации в отсутствие электрического поля, a_r – коэффициент рекомбинации, σ_0 – низковольтная проводимость жидкости, e – элементарный электрический заряд, b – подвижность ионов, Z – валентность ионов, D – коэффициент диффузии, γ – плотность жидкости, u – скорость жидкости, P – давление, η – динамическая вязкость, k_B – постоянная Больцмана, T – температура. Усиление интенсивности диссоциации под действием электрического поля учитывается в уравнении (7.3) при помощи множителя $F(p)$, который определяется уравнениями (7.10)-(7.11) согласно [7.3].

Уравнения (7.1)-7.11 учитывают только два сорта частиц ($i = 1, 2$ – положительные и отрицательные ионы), которые являются одновалентными ($Z_1 = -Z_2 = 1$). Далее предполагается, что они также имеют одинаковые подвижности и коэффициенты диффузии. Все рассмотренные конфигурации могут быть смоделированы в 2D постановке (с использованием осевой или зеркальной симметрии). Во всех моделях использовались следующие предположения и граничные условия: все рассмотренные системы замкнуты, состоят из электродов и диэлектрических поверхностей. На всех этих поверхностях задаётся условие нулевой скорости. На электродах задан постоянный потенциал: 0 для заземлённой плоскости, 30 кВ. – для высоковольтного лезвия, трубки или противоположной плоскости. Остальные стенки являются диэлектрическими и на них используется условие $E_n = 0$. Данное условие подразумевает, что на этих стенках произошло накопление заряда и электрическое поле было заэкранировано слоем поверхностного заряда. Для ионов диэлектрические стенки и электроды одноимённой полярности являются непрозрачными (условие нулевого потока), на электроде противоположной полярности задаётся условие их нейтрализации. Инжекции на электродах нет, единственным механизмом зарядообразования является диссоциация. Свойства жидкости соответствуют свойствам смеси трансформаторного масла и циклогексанола: плотность 885 kg/m³, диэлектрическая проницаемость

3,0, динамическая вязкость 18.2 мПа*с, подвижность ионов 10^{-9} м²/(В/с), низковольтная проводимость $-0.92 \cdot 10^{-8}$ С/м, температура 22 град Цельсия.

Высокая проводимость жидкости оправдывает пренебрежение инжекцией и учёт только эффекта Вина, а также предположение об экранировке нормальной компоненты поля на диэлектрических поверхностях. Анализ последнего предположения проведен далее.

Рассмотрим в начале систему электродов типа лезвие-плоскость. Эта система обладает плоской симметрией и позволяет моделировать течения в двумерном приближении, рассматривая только половину лезвия и кюветы. При радиусе закругления кончика лезвия в 10 мкм удастся получить весьма высокую напряженность поля в окрестности кончика лезвия. Рассмотрим результаты компьютерного моделирования ЭГД-течений, обусловленных эффектом Вина для системы электродов лезвие над плоскостью. На рис.7.1 приведены в увеличенном масштабе: а -распределения напряженности поля и интенсивности диссоциации, б - плотности объёмного заряда и модуля скорости. Как видно из результатов моделирования (см. рис.7.1) в окрестности кончика лезвия напряженность поля, превышает 10 МВ/м, а относительная интенсивность диссоциации выше 20 (и в максимуме превышает 2000). Размеры области повышенной диссоциации порядка 50 мкм

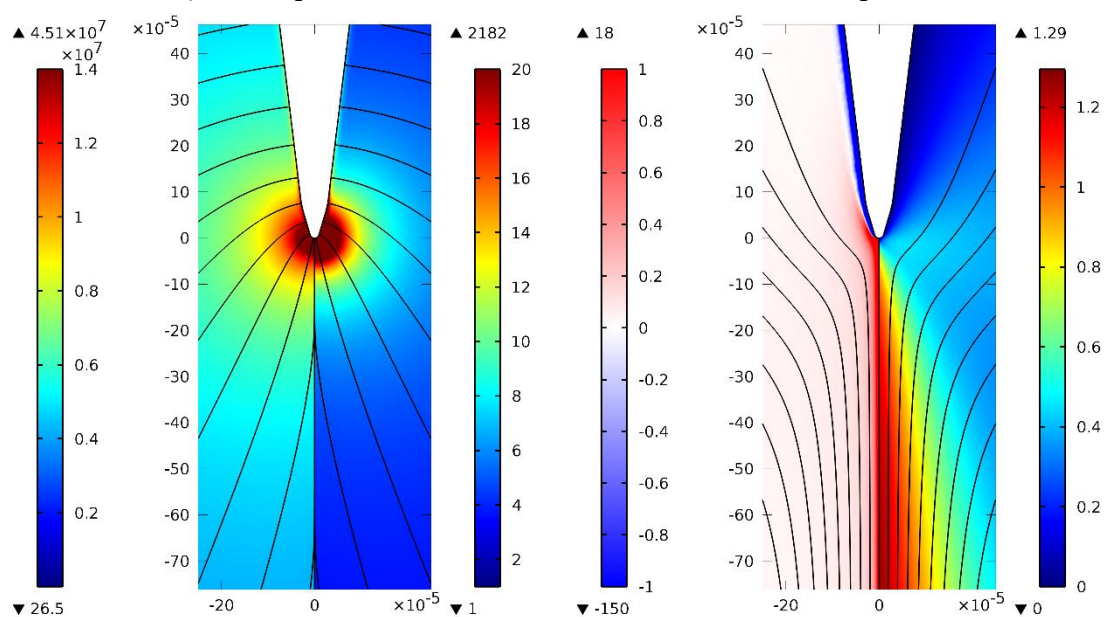


Рис. 7.1. а – Распределение электрического поля В/м (слева) и относительной интенсивности диссоциации (справа) вблизи острия лезвия, а также силовые линии напряжённости поля; б – Распределение плотности объёмного заряда К/м³ (слева) и скорости ЭГД-течения м/с (справа) вблизи острия лезвия, а также линии тока жидкости.

У кончика лезвия, в зоне повышенной концентрации ионов наблюдается разделение заряда: противоионы смещаются к поверхности электрода, образуя тонкий слой гетерозаряда непосредственно у поверхности электрода, а одноименные ионы мигрируют в объем жидкости. Поэтому вокруг острия лезвия возникает биполярный слой: гетерозаряд у поверхности электрода, и слой гомозаряда, окаймляющий первый слой. Но так как поток одноимённых ионов с поверхности электрода равен нулю, т.е. инжекция отсутствует, то непосредственно к его поверхности примыкает тонкий слой гетерозаряда – слой избытка противоионов. Тонкая струйка, заряженная одноименно с электродом, распространяется из слоя, заряженного одноименно с электродом. Она распространяется из приэлектродной

области к плоскости и имеет толщину порядка 1-10 мкм, поэтому на рис.7.1 приведены увеличенные фрагменты приэлектродной области течения.

Полная картина течения приведена на рис. 7.3. Как видно из рис.7.1б, полуширина профиля заряженной струйки и скорости вблизи острия имеет порядок сотых долей миллиметра. Однако за счёт большой вязкости она быстро увеличивается, и в середине МЭП достигает 0,1 мм (рис.7.2).

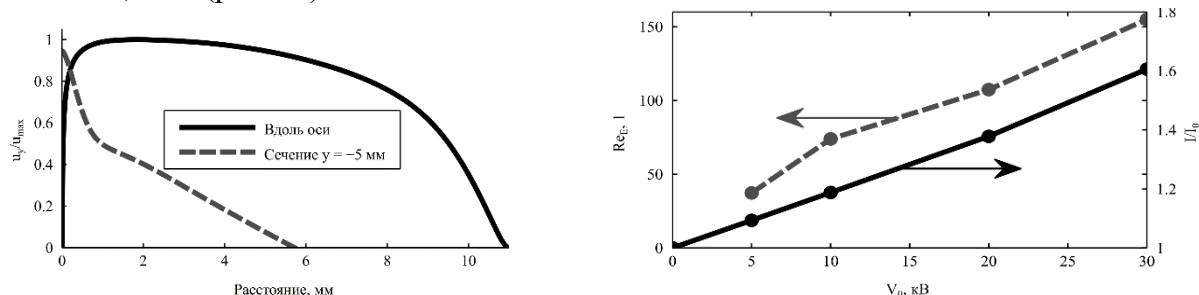


Рис.7.2. Продольное распределения модуля скорости и профиль скорости в центральной струе (слева), приведенная ВАХ и зависимость безразмерного расхода (электрического числа Рейнольдса) от напряжения (справа).

На этом же рисунке приведено распределение скорости вдоль межэлектродного промежутка. На участке длиной в десятые доли миллиметра жидкость ускоряется до скорости, превышающей 1 м/с. Заряженная струйка проникает достаточно далеко в объем жидкости и оказывает ощутимое влияние на распределение электрического поля: на рис.7.1а видно, что силовые линии поля в области струйки объемного заряда расходятся от неё. Плотность гомозаряда в струйке весьма высока. ЭГД-течения направлены от лезвия к плоскости и имеют характерную зонную структуру: короткую зону ускорения, зону квазиоднородного течения, занимающую большую часть межэлектродного промежутка и зону торможения у плоского электрода (см. рис. 7.2.). У противоэлектрода давление существенно повышено, а в остальной части МЭП понижено. Эти структурные особенности отличают течения, обусловленные эффектом Вина, от течений инжекционного типа. В течениях инжекционного типа нет биполярной структуры приэлектродного заряженного слоя, заряженная струйка формируется из слоя гомозаряда, окаймляющего всю поверхность инжектирующего электрода и поэтому поперечные размеры заряженной струйки значительно шире, порядка 1 мм. При столь высокой проводимости инжектированный заряд рекомбинирует в тонком приэлектродном слое слабо проникая в объем жидкости. Однако для выявления структурных различий поля скоростей течений инжекционного и диссоционного типа необходимо очень высокое пространственное разрешение распределения скоростей. Эти различия лучше видны на линейных зависимостях профиля скорости и распределением скорости вдоль течения, а также на интегральных характеристиках: зависимостях средней скорости в центральной струе от напряжения и приведенной вольтамперной характеристики (ВАХ). Эти зависимости, восстановленные по результатам моделирования для системы лезвие-плоскость, приведены на рис. 7.2. Профили скорости имеют два выраженных квазилинейных участка, характеризующих внутреннюю – заряженную и внешнюю нейтральную части центральной струи. Продольное распределение скорости характеризуется очень короткой зоной ускорения, зоной квазиоднородного течения и зоной торможения. Скоростная структура центральной струи ЭГД-течения диссоционного типа также специфична и характеризуется чрезвычайно узкой центральной струйкой,

а также необычным распределением давления: давление понижено во всей жидкости, а не только у поверхности лезвия, как это было в случае инъекции.

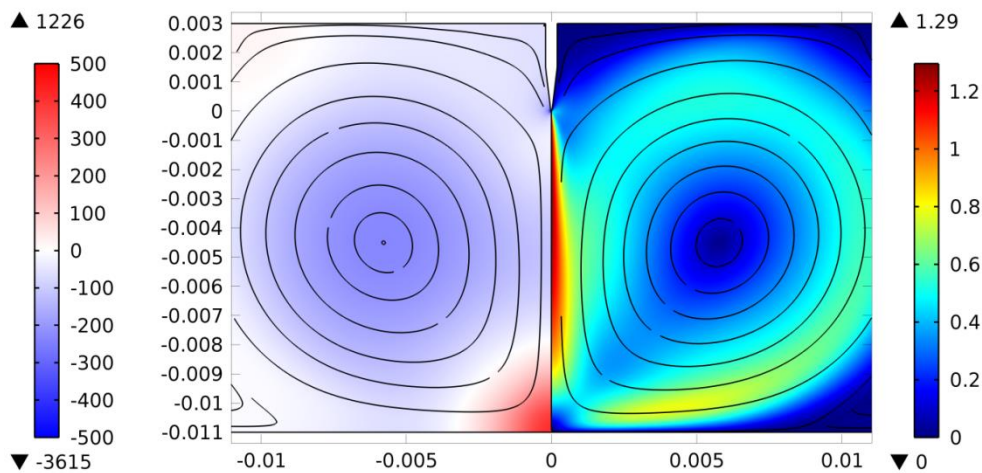


Рис. 7.3. Распределение давления P_a (слева) и скорости м/с (справа)

Приведенная ВАХ носит линейный характер, видно, что несмотря на очень высокое локальное повышение проводимости в приэлектродной области интегральный эффект не очень существен и не превышает 1,6. В этой величине учитывается также и незначительное усиление интенсивности диссоциации во всем МЭП. Следует отметить, что инъекционный эффект в жидкости столь высокой проводимости, судя по вольтамперным характеристикам растворов бутанола в трансформаторном масле, приведенным в главе 2, дает менее значительный эффект, не более 10%. Зависимость без размеренного расхода (электрического числа Рейнольдса (средней скорости жидкости, отнесённой к средней скорости дрейфа ионов)) от напряжения линейна, это отлично от типовой зависимости с насыщением для ЭГД-течений инъекционного типа (см. главу 4,5). Таким образом можно выделить основные отличия течений, обусловленных эффектом Вина: биполярные приэлектродные слои, тонкие заряженные струйки, формирующие ЭГД-течение, существенный рост высоковольтной проводимости в жидкостях с высоким уровнем низковольтной проводимости и линейный характер зависимости безразмерного расхода (электрического числа Рейнольдса) от напряжения в режиме развитого течения.

Рассмотрим течения, обусловленные эффектом Вина от трубчатых электродов. Трубчатые электроды представляют собой некоторый аналог лезвиеобразных. Для таких электродов можно достичь весьма высоких напряженностей поля на торцевых поверхностях электрода при малой толщине стенок трубки и радиусах закругления торца. Электрофизические процессы и ЭГД-течения в системе трубчатый электрод-плоскость имеет осевую симметрию. При большом диаметре трубчатого электрода и малом межэлектродном расстоянии ситуация близка к системе лезвие-плоскость. При малом диаметре трубчатого электрода по сравнению с межэлектродным расстоянием ситуация изменяется. Изучение ЭГД-течения обусловленное диссоциацией от трубчатых электродов представляет также и самостоятельный интерес, поскольку подобные электроды весьма перспективны для ЭГД-насосов. Рассмотрим кювету из диэлектрического материала, в которой размещены электроды: трубка над плоскостью, причем ось трубчатого электрода перпендикулярна плоскости, а диаметр трубчатого электрода существенно меньше межэлектродного расстояния. Оказалось, что в этом случае направление и структура возникающего ЭГД-

течения, обусловленного эффектом Вина, зависит от длины трубчатого электрода, выступающего из диэлектрической пластины. Рассмотрены два случая большой – (3 мм) и малой – (0,1 мм) длины электрода Система уравнений, тип жидкости и граничные условия аналогичны рассмотренным ранее.

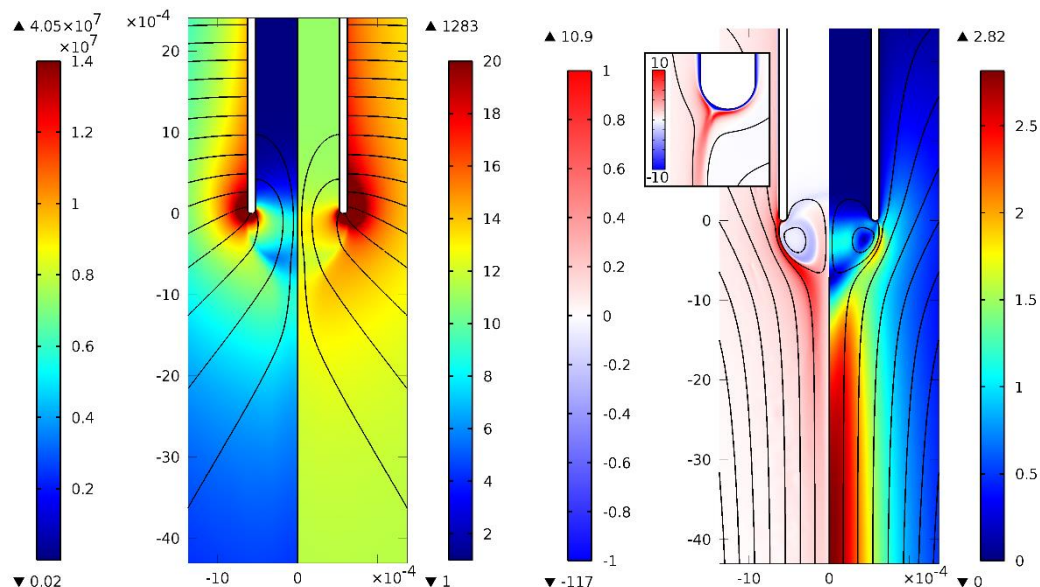


Рис. 7.4. а – Распределение электрического поля В/м(слева) и относительной интенсивности диссоциации (справа) вблизи окончания трубки, а также силовые линии электрического поля; б – распределение плотности объемного заряда К/м³ (слева) и скорости ЭГД-течения м/с (справа) вблизи торца трубки (диаметр трубчатого электрода 1 мм., толщина стенки 0.1 мм), а также линии тока жидкости.

Рассмотрим результаты решения для случая длины трубчатого электрода, 3 мм, превышающей диаметр трубчатого электрода. На рис. 7.4. а приведены распределения напряженности поля (слева) и интенсивности диссоциации (справа) в окрестности трубчатого электрода. Как видно из рис 7.4. а - распределение напряженности электрического поля в системе трубка над плоскостью в окрестности торца трубчатого электрода весьма необычно: максимум напряженности лежит в области торца трубчатого электрода и ее внешней поверхности, а в области внутренней поверхности трубчатого электрода и у оси симметрии наблюдается минимум напряженности поля. Поэтому интенсивность диссоциации максимальна вдоль торцевой поверхности трубчатого электрода, в то время как в центре интенсивность диссоциации существенно ниже. Также как у лезвиеобразного электрода, у торцевой поверхности трубчатого электрода видна область повышенной диссоциации, однако разделение заряда в области повышенной диссоциации происходит иначе: повышенная плотность положительного заряда формирует положительную струйку, текущую с внешней поверхности электрода, а с внутренней поверхности торца трубчатого электрода стекает струйка отрицательного заряда, образующая мини вихрь в полости трубчатого электрода. Такая биполярная структура характерна для ЭГД-течений обусловленных эффектом Вина и описана в главе 3, на рис. 3.6. В случае «длинного» электрода электрическое поле максимально у внешней части торца трубки и направлено под углом к оси трубки. Поэтому центральная струйка распространяется от трубчатого электрода к плоскому. Тонкие струйки одноименного заряда с внешней торцевой поверхности трубчатого электрода сливаются на оси модели на расстоянии порядка радиуса трубчатого электрода, образуя колоколообразную заряженную структуру, форми-

рующую на некотором отдалении от электрода единую заряженную струйку, распространяющуюся вдоль оси модели. Толщина объединенной заряженной струйки значительно больше, чем толщина начальной струйки от лезвиеобразного электрода и составляет порядка 500 мкм. В отличие от системы лезвие-плоскость, течение имеет две области ускорения: начальная область у торца трубки в области тонкой начальной заряженной струйки и вторичная область ускорения объединенного течения, которая значительно шире порядка 1 мм. Максимальная скорость ЭГД-течения выше, чем от лезвия и достигает 2.5 м/с в объединённой струйке. Таким образом трубчатый электрод является своеобразным усилителем объединенной центральной струи ЭГД-течения. Благодаря столь необычной структуре центральной струи создается разность давлений между внутренней областью трубчатого электрода и областью объединенной струйки течения, подсасывающая жидкость из трубчатого электрода.

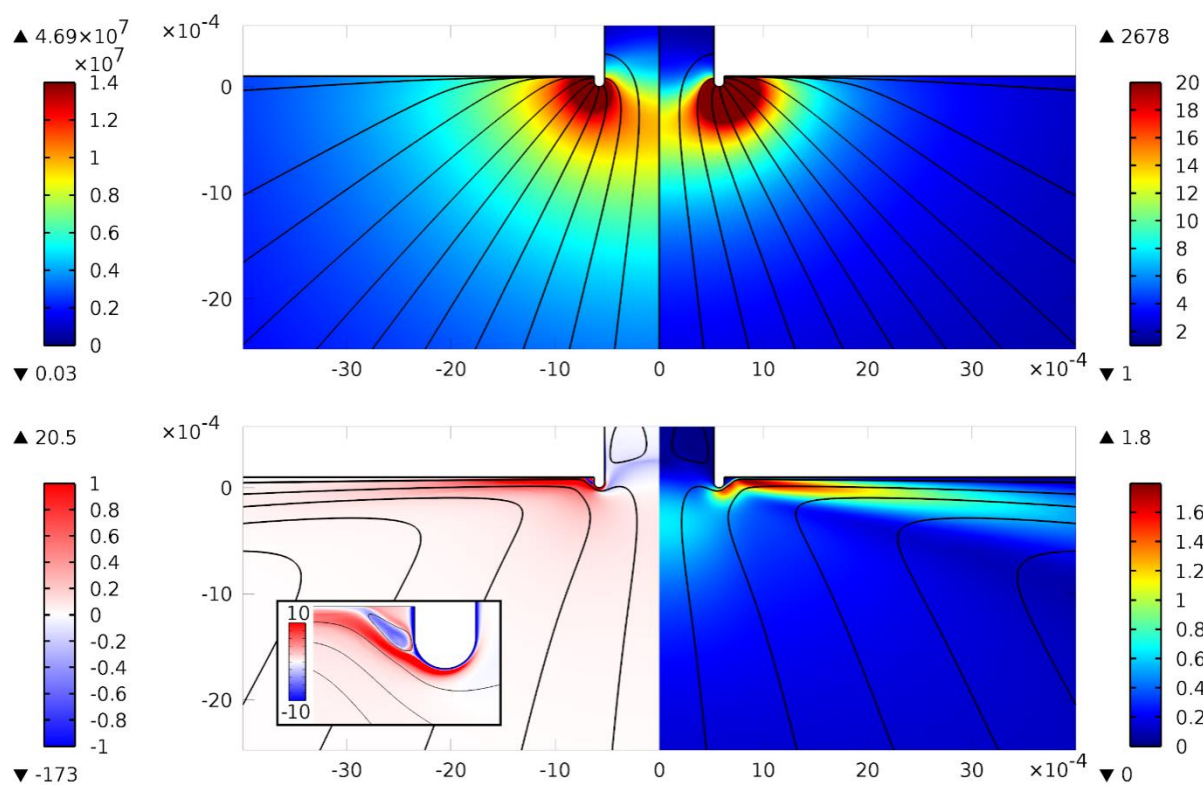


Рис.7.5. а – Распределение электрического поля В/м (слева) и относительной интенсивности диссоциации (справа) вблизи окончания трубки, а также силовые линии электрического поля; б – Распределение плотности объемного заряда К/м³ (слева) и скорости ЭГД-течения (справа) вблизи окончания трубки, а также линии тока жидкости. На рис.7.5б справа увеличенный фрагмент торца трубчатого электрода.

В случае, когда трубчатый электрод слабо выступает над поверхностью диэлектрика, на 0,1 мм, распределение напряженности поля и интенсивности диссоциации, по-прежнему, сосредоточены в области торцевой поверхности трубчатого электрода, см. рис. 7.5. Максимум напряженности также, как и ранее выше 10 мВ/м, а относительное усиление степени диссоциации превышает 20. Как видно из увеличенного фрагмента, в области торца трубчатого электрода возникает область повышенной проводимости в которой происходит разделение заряда и возникают две противоположно заряженные струйки: внешняя, положительная, распространяющаяся вдоль поверхности диэлектрика и отрицательная внутренняя, образующая микро вихрь в полости трубки. Однако поле направлено вдоль поверхности диэлектрика. Поэтому основная заряженная струйка, формирующаяся из области повышенной диссоциации направлена также вдоль поверхности диэлектрика.

Напомним, что нормальная компонента поля вдоль поверхности диэлектрика равна нулю, поэтому Кулоновская сила из области повышенной проводимости направлена вдоль поверхности диэлектрика, она и ускоряет жидкость в направлении вдоль поверхности диэлектрика. Поэтому возникающее ЭГД-течение обусловленное диссоциацией с большим ускорением растекается вдоль поверхности диэлектрика. Поскольку в центре трубчатого электрода поле понижено, то здесь имеется область разряжения и под действием градиента давления жидкость с небольшим ускорением подтекает к центральной оси отверстия трубчатого электрода. Струйка заряжается в области повышенной диссоциации зарядом, одноименным с электродом и ускоряется электрическим полем в направлении касательном к поверхности диэлектрика. Центральная струйка гомозаряда растекается под небольшим углом к поверхности диэлектрика. В центральной области трубчатого электрода наблюдается микровихрь с зарядом противоположного знака.

Следующее течение, обусловленное эффектом Вина [7.5-7.7] возникает, когда область повышенной диссоциации удастся разместить вдали от электродов. Поскольку четких различий в структуре центральной струи ЭГД-течений инжекционного типа и обусловленных эффектом Вина от металлических электродов выявить не удастся для исследования ЭГД-течений обусловленных эффектом Вина предложено использовать отверстие в диэлектрическом барьере, размещенного в середине межэлектродного промежутка между двумя плоскими электродами. Напряженность поля в области отверстия в установившемся режиме повышена из-за того, что силовые линии электрического поля проходят сквозь отверстие под влиянием накопившегося на поверхности барьера электрического заряда. Поэтому в области отверстия наблюдается эффект Вина и должны возникать связанные с ним ЭГД-течения. В работе [7.8] показано, что такие течения реализуются, однако, как и в случае трубчатого электрода, слабо выступающего из диэлектрической стенки они направлены вдоль поверхности диэлектрика. Этот эффект обусловлен неоднородным распределением напряженности поля в отверстии, имеющим, как и в предыдущем случае максимальные значения на краях отверстия и провал напряженности в центре. Описанная ситуация близка к ситуации со слабо выступающим трубчатым электродом.

На рис. 7.6 приведены распределения напряженности поля и интенсивности диссоциации (слева) и распределения скорости ЭГД-течений и плотности объемного заряда (справа) для системы отверстие-плоскость. В этом случае также, как и ранее в области краев отверстия наблюдается существенное усиление напряженности поля и интенсивности диссоциации (в 20 раз). Однако из-за отсутствия электрода в области отверстия разделение заряда происходит несколько иначе, а именно: из области повышенной диссоциации, расположенной, как и в предыдущем случае на краю отверстия, формируются две противоположно заряженных струйки, одна из которых (отрицательная) направлена, как и в предыдущем случае, от отверстия вдоль поверхности диэлектрика, а вторая (положительная) вдоль внутренней поверхности отверстия. Поэтому ЭГД-течения, возникающие в жидкости, также, как и в случае слабо выступающего электрода, ускоряются и направлены вдоль поверхности диэлектрика и подтекают из объема к отверстию. Они имеют аналогичную предыдущему случаю структуру. Основная центральная струйка, обеспечивающая ускорение течения лежит в области повышенной диссоциации у торца отверстия, линии тока ЭГД-течения проходят у поверхности диэлектрика и направлены под малым углом к нему. На уровне подтока жидкости к отверстию имеется область разряжения и вторичная зона слабого ускорения, обусловленная градиентом давления.

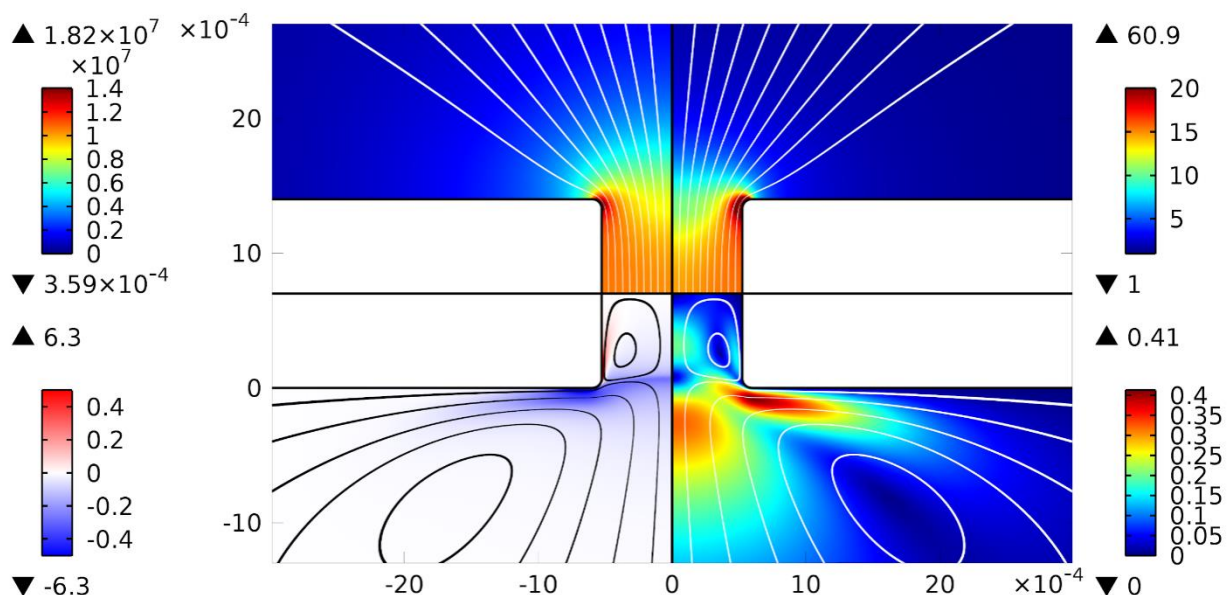


Рис.7.6. Распределение вблизи отверстия: напряжённости и силовых линий электрического поля (верхняя левая четверть), относительное усиление интенсивности диссоциации и силовых линий поля (верхняя правая четверть), плотности объёмного заряда и линии тока жидкости (нижняя левая четверть), модуля скорости и линий тока жидкости (нижняя правая четверть).

Таким образом, структура аномального ЭГД-течения от отверстия в диэлектрике определяется характерным распределением электрического поля в области отверстия, имеющим максимумы в области торцов отверстия в диэлектрике и провалы в центре отверстия. Подобное распределение возникает также и у трубчатого электрода, слабо выступающего из диэлектрика. Поэтому возникающие ЭГД-течения обусловленные эффектом Вина в обоих случаях подобны и направлены из объема к центру отверстия.

Рассмотрим еще один вид ЭГД-течений обусловленных повышенной диссоциацией, расположенной вдали от электродов.

В этом случае ЭГД-течения обусловленные эффектом Вина можно проанализировать у поверхности диэлектрического барьера, наполовину перекрывающего межэлектродный промежуток между двумя плоскими электродами. Рассмотрим случай, когда внутренняя торцевая поверхность барьера имеет форму лезвия. Эта модель позволяет наиболее отчетливо проследить процессы, происходящие при проявлении эффекта Вина вдали от электродов. На рис.7.7 приведены распределение электрического поля, относительной интенсивности диссоциации, объёмного заряда и скорости ЭГД-течения обусловленного эффектом Вина у лезвиеобразной торцевой поверхности диэлектрического барьера в установившемся режиме (масштаб увеличенный). Поскольку в модели электроды плоские, то силовые линии поля в основной части направлены параллельно друг другу и поверхности барьера. Поскольку модель обладает зеркальной симметрией, то рассчитана только одна половина. В области барьера из-за накопления поверхностного заряда на поверхности барьера нормальная компонента поля равна нулю. Поэтому силовые линии поля обтекают барьер и создают у лезвиеобразной оконечности барьера область повышенной напряженности поля, достигающей, как и ранее 10 МВ/м (см. рис 7.7 (слева)).

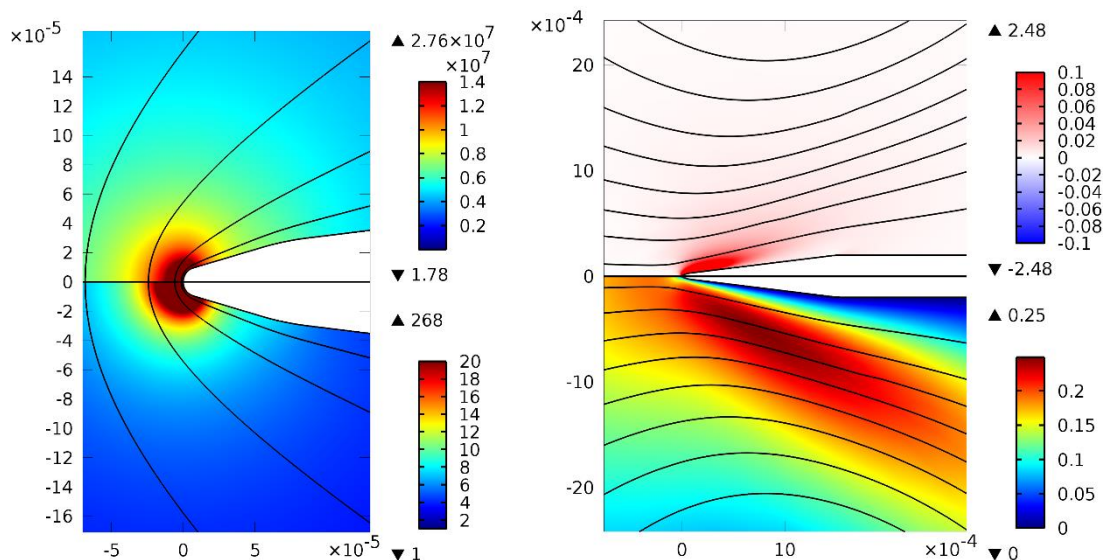


Рис.7.7. Распределение величин вблизи острия диэлектрического лезвия: а (слева) - напряжённость электрического поля В/м (сверху) и относительное усиление интенсивности диссоциации (снизу), а также силовые линии поля; б (справа) - плотность объёмного заряда К/м³(сверху) и модуль скорости ЭГД-течения м/с (снизу), а также линии тока жидкости.

В этой области относительная интенсивность диссоциации существенно (20 раз) повышена. В области повышенной концентрации возникает разделение заряда и под действием Кулоновских сил возникают две симметричные заряженные струйки, распространяющиеся по силовым линиям поля вдоль лезвиеобразной поверхности барьера: вдоль верхней поверхности положительная струйка, вдоль нижней – отрицательная. Течение направлено из объема на диэлектрическое острие и симметрично относительно центральной плоскости модели. Действительно, из рис. 6 видно, что, как и у краёв отверстия, на острие диэлектрического лезвия поле и интенсивность диссоциации максимальны. В целом, течение вдоль диэлектрического лезвия имеет несколько меньшую интенсивность (0.25 м/с), чем течение вдоль барьера от отверстия, но обладает ещё одной ранее не изученной особенностью. Сопоставляя металлическое и диэлектрическое лезвия, можно отметить, что в обоих случаях максимальная напряжённость поля достигается на острие, но направления силовых линий электрического поля различаются: у металлического лезвия они перпендикулярны поверхности электрода, у диэлектрического – параллельны. Поэтому Кулоновские силы направлены в случае металлического лезвия от него, а в случае диэлектрического вдоль его поверхности, вызывая течения встречных направлений. Этот пример демонстрирует симметричное двух струйное ЭГД-течение обусловленное диссоциацией из области повышенной диссоциации. ЭГД-течения направлено из объема на диэлектрическое лезвие, движущие центральные струйки по обеим сторонам барьера имеют разную полярность и движутся из зоны повышенной диссоциации вдоль поверхности диэлектрического лезвия. Именно в этих струйках происходит ускорение жидкости, т.е. электрическая энергия преобразуется в гидродинамический.

В предыдущих задачах считалось, что на поверхности диэлектрического барьера заряд уже накоплен и поэтому нормальная компонента электрического поля равна нулю. Однако накопление заряда на поверхности диэлектрика может происходить достаточно долго и не всегда полностью экранирует поле. Поэтому этот процесс следует исследовать. Рассмотрим [7.11-7.12], как и в предыдущем случае, систему с идеальным твёрдым барьером

ром в форме листа с закруглённым краем, помещённым между двумя плоскими электродами, которые находятся под разностью потенциалов V_0 , в слабопроводящей жидкости.

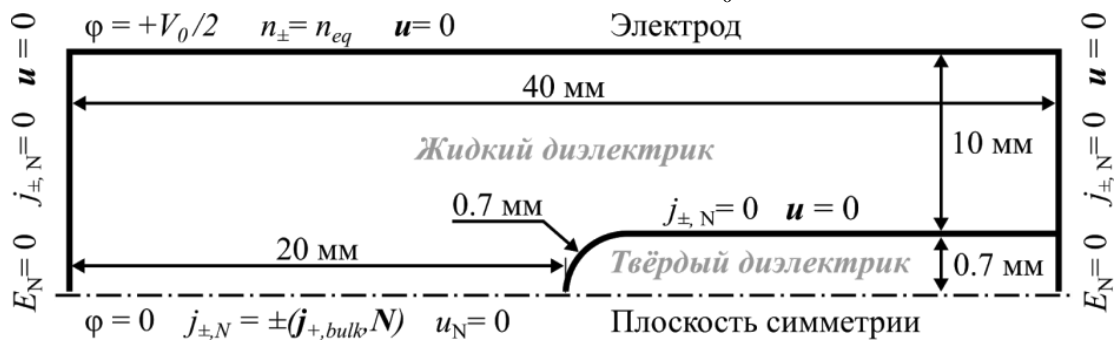


Рис. 7.8. Геометрия построенной модели и граничные условия задачи.

В отличие от предыдущих задач не будем использовать условие равенства нулю нормальной компоненты поля на границе барьера. Остальные граничные условия сохраним. В качестве граничного условия на переменные уравнения Нернста-Планка на электроде положим равенство концентраций равновесным, умноженным на квадратный корень из функции Онзагера: $n_{eq} = n_0 \sqrt{F(p)}$. Таким образом мы исключаем из рассмотрения гетерослой вблизи электрода, считая их размер «бесконечно малым», что существенно облегчает решение задачи. В этих условиях приэлектродные слои у поверхности диэлектрического барьера будут формироваться естественным образом. Представляет интерес рассмотреть структуру слоев и сопутствующих ЭГД-течений при различных проводимостях исследуемых жидкостей. Рассмотрим два случая «высокой» и «низкой» проводимости жидкости.

Рассмотрим результаты моделирования для случаев «высокой» удельной проводимости жидкости - 10 нСм/м. На рис. 7.9. изображены контурные распределения и силовые линии электрического поля (вверху), распределения объемного заряда (в середине), распределения модуля скорости и линии тока ЭГД-течения в жидкости с проводимостью 10 нСм/м. Видно, что силовые линии поля вне барьера однородны и нормальны электродам. У края барьера силовые линии огибают диэлектрический барьер, а вдоль барьера они направлены вдоль его поверхности. Напряженность поля вне барьера однородна и мала, а у края барьера существенно повышена. В области повышенной напряженности поля происходит разделение объемного заряда, у края барьера видна область, заряженная отрицательно. Ситуация аналогична рассмотренному случаю с диэлектрическим лезвием, однако граничные условия на поверхности барьера иные. Приэлектродные заряженные слои практически не видны, ввиду своей малости. Однако степень экранировки нормальной компоненты электрического поля приэлектродным слоем высока. На рис. 7.10 для визуализации приэлектродного слоя, распределения нормальной и тангенциальной компонент поля, относительной плотности объемного заряда и относительной концентрации отрицательных ионов приведены в логарифмическом масштабе. Распределения вдоль нормали к барьеру приведены на двух различных расстояниях от края барьера: большого (10,7 мм от края барьера) и маленького (1,7 мм от края барьера). Видно, что у поверхности диэлектрического барьера имеется диффузный положительно заряженный слой, толщина диффузного слоя, порядка 1 мкм. Напряженность поля у поверхности диэлектрика на большом расстоянии от края в 12, а на малом в 6 раз выше среднего поля в межэлектродном промежутке. Степень экранировки нормальной компоненты поля очень высока: у поверх-

ности барьера $E \gg 1$, а вне слоя относительная нормальная компонента поля значительно меньше – порядка 0.001. Тангенциальная компонента поля на большом расстоянии от края барьера мала, а на малых расстояниях от края равна 1. Концентрация отрицательных ионов в пределах диффузного слоя понижена, однако неравновесного слоя за пределами диффузного практически нет, а силовые линии поля полностью огибают барьер, и вблизи закругления пластины возникает область значительно повышенного поля (рис. 7.10). В этой области проявляется эффект Вина и возникает область повышенной концентрации ионов. В области повышенной концентрации ионов в соответствии с электрокондуктивным механизмом происходит разделение заряда. Образовавшись вблизи закругления пластины, ионы смещаются к электродам противоположного знака. Так, в рассматриваемой модели отрицательные ионы сместились в сторону положительного электрода, а положительные к отрицательному. Вблизи закругления барьера возник избыток отрицательных ионов, и появилась сила Кулона, направленная против силовых линий электрического поля. В результате, также, как и в случае с диэлектрическим острием, формируется ЭГД-течение, направленное на барьер. Однако конвективного сноса заряда не видно. ЭГД-течение достаточно быстро отходит от поверхности барьера и кювете формируется замкнутая ячейка (см. рис. 7.10, внизу).

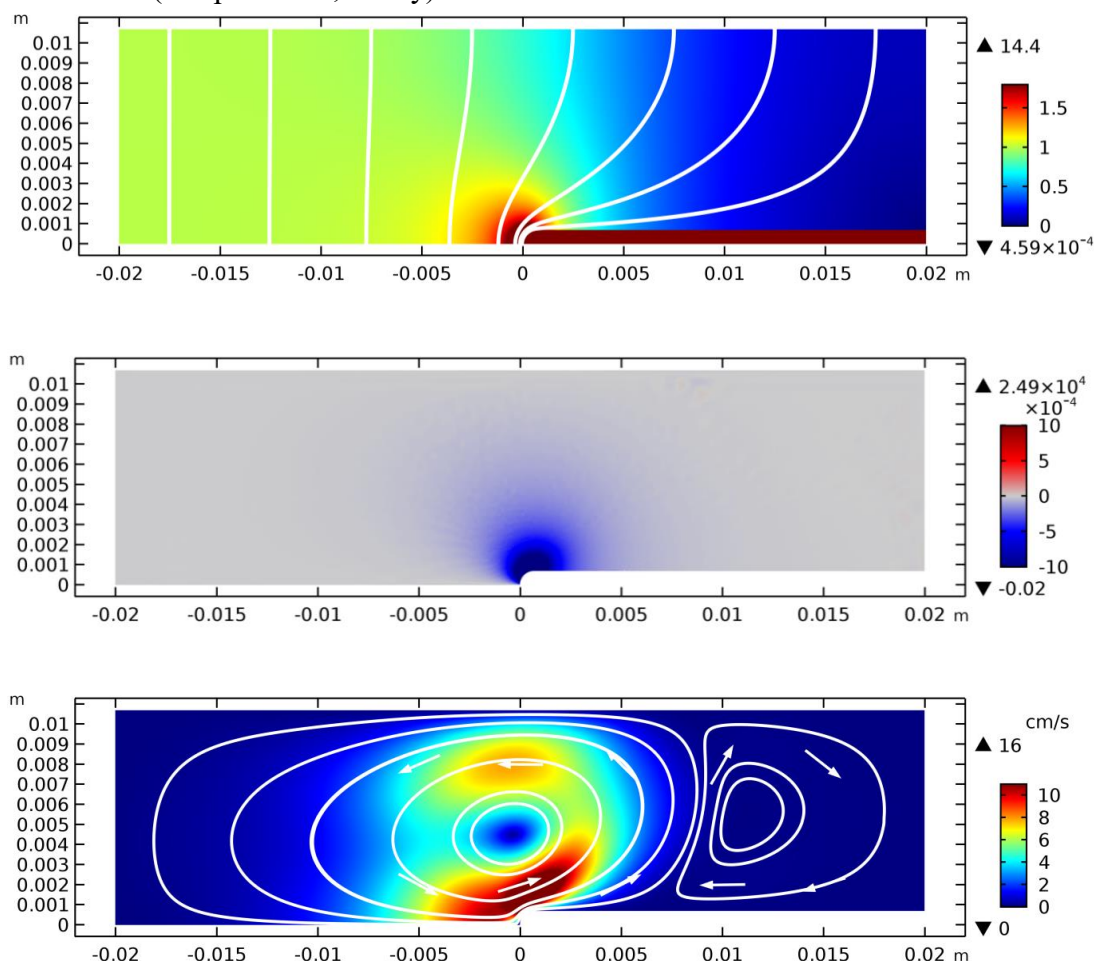


Рис. 7.9. Контурные распределения и силовые линии электрического поля (вверху), распределения объемного заряда (в середине), распределения модуля скорости и линии тока ЭГД-течения в жидкости с проводимостью 10 нСм/м.

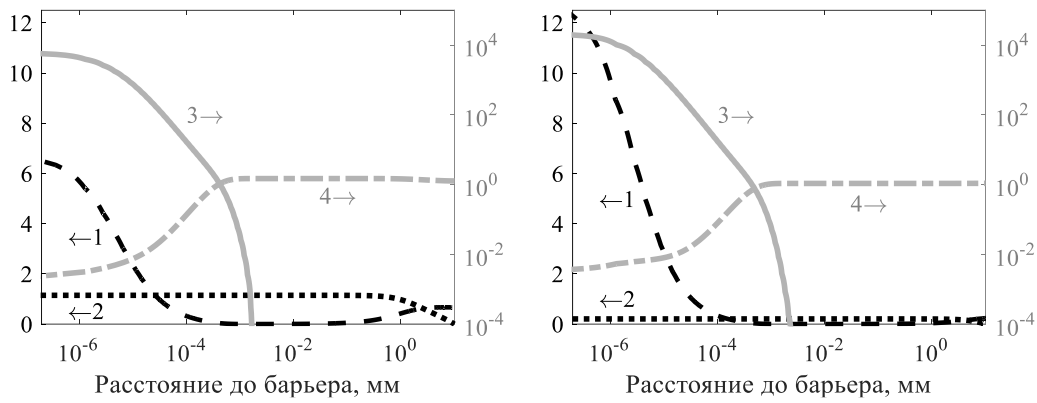


Рис. 7.10. Профили напряжённости поля (1 $-E_N/E_0$, 2 $-E_{||}/E_0$) и плотности объёмного заряда (3 $-(n_+ - n_-)/n_0$) и концентрации отрицательных ионов (4 $-n_-/n_0$) на расстоянии 1.7 мм (слева) и 10.7 мм (справа) от торца барьера в жидкости с проводимостью 10 нСм/м.

Вследствие усиления интенсивности диссоциации за счёт эффекта Вина в областях сильного электрического поля (вблизи конца барьера, рис. 7.10.) возникает также увеличение проводимости. В областях, где эффект Вина не вносит значительного вклада, проводимость усиливается существенно меньше. Возникает градиент проводимости. Объёмный заряд, возникший из-за этого градиента:

$$\rho_v = -\varepsilon_t \varepsilon_0 \vec{E} \frac{\nabla \sigma}{\sigma} \quad (7.12)$$

Таким образом, согласно формуле 7.12 наличие градиента проводимости, приводит к разделению заряда и появлению двух разноименных струй ЭГД-течения, направленных вдоль поверхности барьера.

Рассмотрим результаты моделирования для жидкости более «низкой» проводимости. На рис. 7.11. приведены: силовые линии напряжённости электрического поля и распределение отношения модуля электрического поля к модулю среднего поля в системе без барьера: $E_0 = V_0/(L+H)$, относительный парциальный электрический заряд $\rho' = (n_+ - n_-)/n_0$ и модуль скорости с линиями тока ЭГД течений в жидкости более «низкой» проводимости 10 пСм/м. Вне барьера поле, создаваемое плоскими электродами, однородно, а силовые линии поля взаимно параллельны и нормальны к электродам. В этом случае экранировка поля неполная и поле частично проникает в барьер. Силовые линии у поверхности барьера изменяют направление и проникают в барьер под косым углом. Это объясняется тем, что за время накопления заряда на поверхности пластины возникает касательная к барьеру составляющая электрического поля, обеспечивающая ионный ток вдоль барьера.

На рис. 7.12. приведены профили напряженности поля, концентрации отрицательных ионов и плотности объемного заряда в пределах приэлектродного слоя на расстоянии 1.7 мм и 10.7 мм от конца барьера.

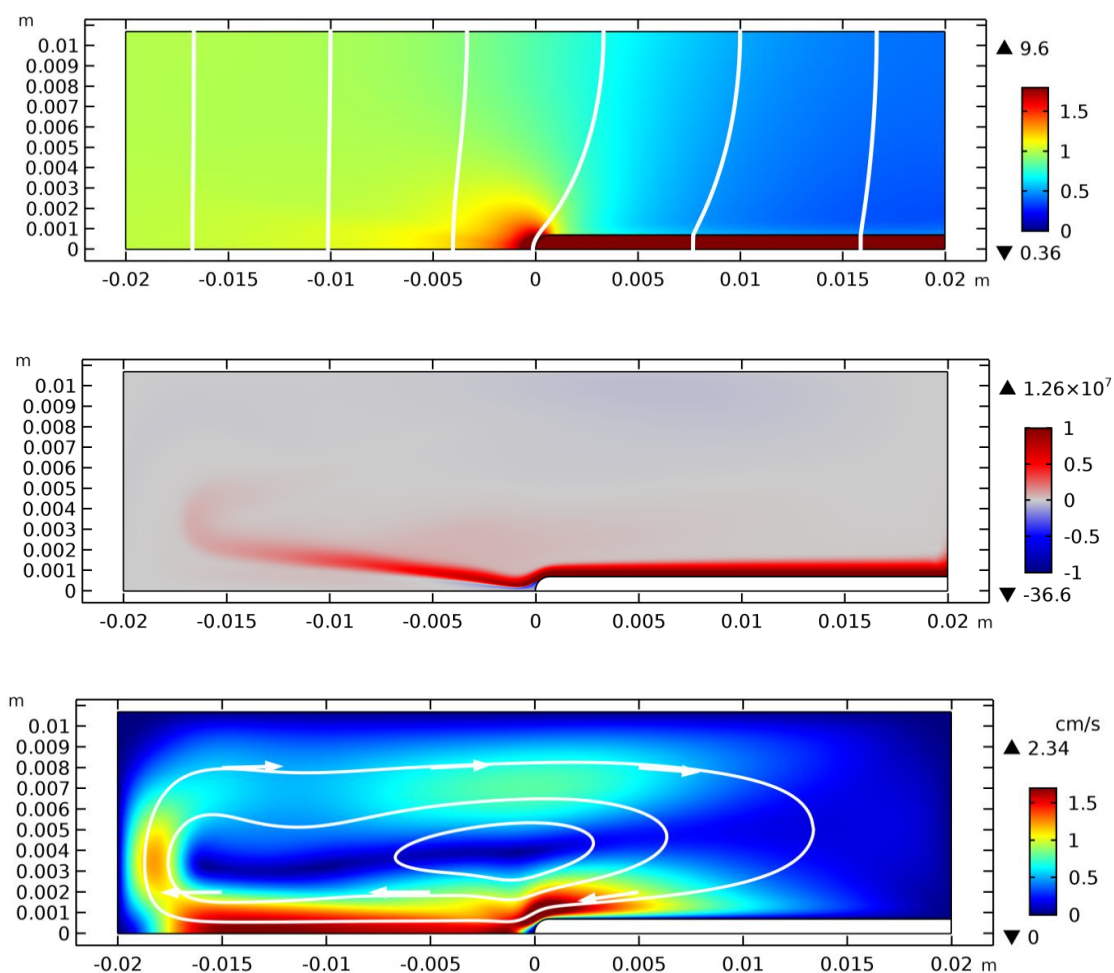


Рис. 7.11. Контурные распределения и силовые линии электрического поля (вверху), распределения объемного заряда (в середине), распределения модуля скорости и линии тока ЭГД-течения в жидкости с проводимостью 10 пСм/м.

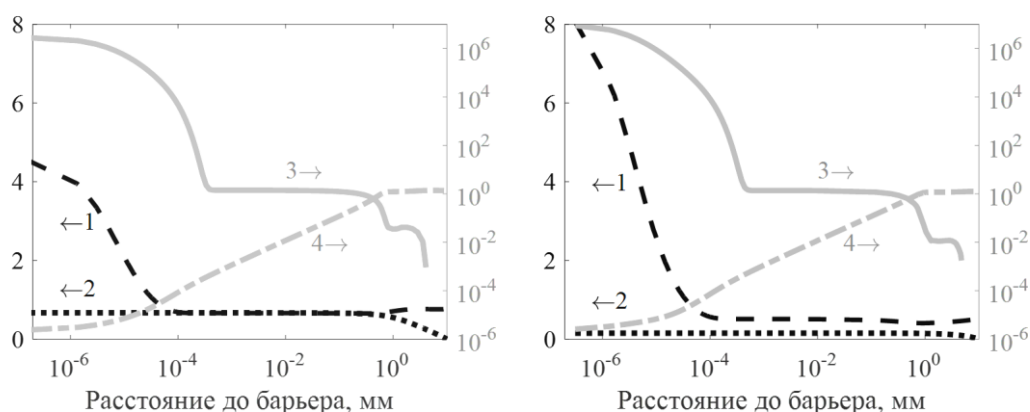


Рис. 7.12 Профили напряжённости поля (1 $-E_N/E_0$, 2 $-E_{||}/E_0$) и относительной плотности объёмного заряда (3 $-(n_+ - n_-)/n_0$) и относительной концентрации отрицательных ионов (4 $-n_-/n_0$) на малом 1.7 мм (слева) и большом расстоянии 10.7 мм (справа) от конца барьера в жидкости с проводимостью 10 пСм/м.

У поверхности барьера возникает относительно тонкий заряженный одноименно с электродом диффузный слой положительных ионов, который возникает благодаря значительно (на несколько порядков) пониженной проводимости твердого диэлектрика и который значительно снижает напряженность поля в жидкости и повышает поле в приэлектродном слое и в диэлектрическом барьере. Однако экранировка поля в жидкости неполная, и поэтому у поверхности барьера появляется также более толстый неравновесный

диссоциационно-рекомбинационный слой, описанный ранее в главе 3. Этот слой возникает благодаря тому, что поверхность барьера не поставляет отрицательных ионов в жидкость и у поверхности барьера возникает область дефицита отрицательных ионов. Толщина этой области определяется безразмерным параметром R равным отношению времени Максвелловской релаксации и времени миграции ионов в электрическом поле от поверхности барьера в жидкость.

Видно, что концентрация положительных ионов в диффузном слое на шесть порядков превышает равновесную, а нормальная компонента напряженности поля почти на порядок выше средней. При этом концентрация отрицательных ионов на поверхности барьера равна нулю и постепенно возрастает в нормальном направлении до равновесного значения на расстоянии порядка 1 мм от поверхности барьера. Нормальная компонента напряженности поля вне барьера, в пределах слоя спадает до уровня $E < 1$, а внутри барьера поле существенно повышено до уровня $E = 9$. У закругленной оконечности барьера силовые линии поля огибают барьер. В области оконечности барьера электрическое поле имеет как нормальную, так и тангенциальную компоненту, при отдалении от оконечности барьера тангенциальная компонента поля падает, а нормальная растет. Поэтому у оконечности барьера существует тангенциальный миграционный ток, осуществляющий перенос положительных ионов в пристеночном слое вдоль поверхности барьера справа налево. Этот ток препятствует накоплению ионов в диффузном слое и полной экранировке электрического поля в жидкости. Таким образом, в отличие от сплошного барьера, в котором тангенциальный ток отсутствует, и поле в жидкости может быть полностью экранировано, в нашем случае экранировка поля неполная и неравновесный слой существует в установленном режиме.

В неравновесном слое понижена концентрация отрицательных ионов и, следовательно, нарушена электронейтральность, т.е. слой заряжен положительно. На рис. 7.11 и 12 видно, что у поверхности барьера имеется слой положительного заряда, причем толщина неравновесного слоя, значительно выше толщины диффузного слоя и составляет около 1 мм. Поскольку электрическое поле в слое имеет касательную компоненту, на слой действует кулоновская сила, вызывающая ЭГД-течение, направленное вдоль поверхности барьера от его основания к краю, которое далее через объем жидкости достигает противоположной стенки кюветы. Течение сносит заряд в тангенциальном направлении за пределы барьера. Как видно из распределения скоростей, основная зона ускорения сосредоточена на верхней границе у оконечности барьера. Далее жидкость движется с постоянной скоростью. Это течение следует отнести к т.н. течениям проводимости, описанным ранее в главе 6, т.е. течениям, возникающим в рекомбинационных слоях до начала инъекции. Эффект Вина в этой жидкости практически не ощущаем, т.к. напряженность электрического поля у оконечности барьера повышена незначительно, а собственная проводимость жидкости низка. Следует отметить, что полярность объемного заряда, вызванного эффектом Вина противоположна, т.е. отрицательна, а течения имеют встречную направленность. Структура приэлектродных слоев несколько изменяется вдоль барьера, ближе к краю барьера тангенциальная компонента поля возрастает, а нормальная — уменьшается.

С увеличением проводимости жидкости течения проводимости плавно сменяются течениями, обусловленными эффектом Вина. Граничной проводимостью является проводимость равная 30 пСм/м. На рис. 7.13 приведены распределение объемного заряда(вверху) и скорости ЭГД-течений при проводимости 30 пСм/м. В жидкости реализовано

два встречных течения: течение проводимости – вдоль поверхности барьера к его краю и течение, обусловленной эффектом Вина, направленное из объема жидкости к краю барьера. Оба течения равной интенсивности и образуют единую вертикальную к барьеру центральную струю, заряженную биполярно. Слева в струю попадает положительный заряд из неравновесного слоя, а справа – отрицательный из области повышенной диссоциации.

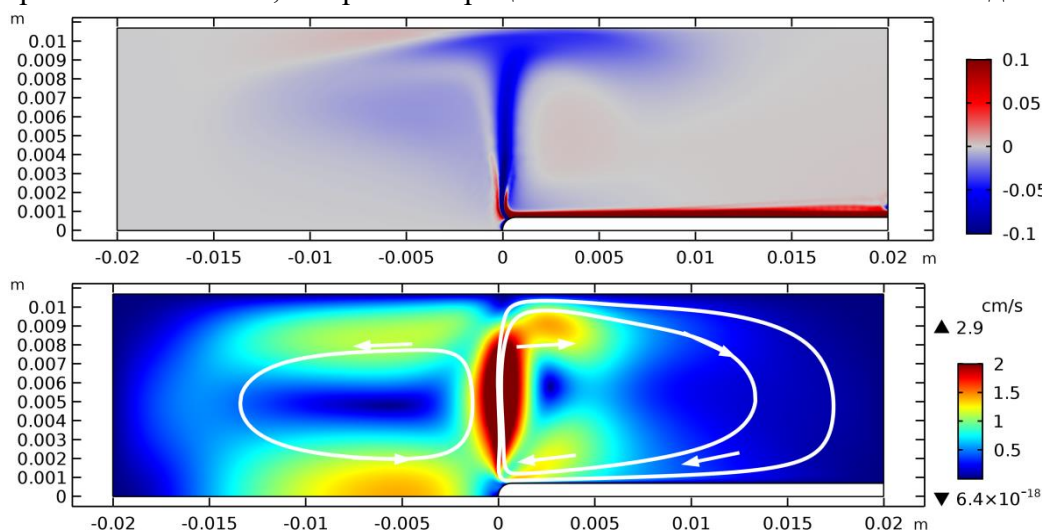


Рис. 7.13. Распределение объемного заряда(вверху) и скорости ЭГД-течений (внизу) при проводимости жидкости 30 пСм/м.

Сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментом.

На рис.7.14 -15 представлено сравнение контуров скорости и линий тока в системе лезвие-плоскость, а также сравнение профилей скорости и её распределений вдоль центральной струи для напряжения 22,1 кВ. Видно хорошее качественное соответствие результатов расчета и моделирования. Однако наблюдалось небольшое численное различие расчётных и экспериментальных данных. Расхождение достигает 20% в области центральной струи ЭГД-течения. Однако учитывая очень тонкую структуру центральной струи и огромные градиенты скорости в ее пределах такое различие можно объяснить невысоким разрешением экспериментальных результатов. Тем не менее, компьютерная модель корректно описывает структуру течения.

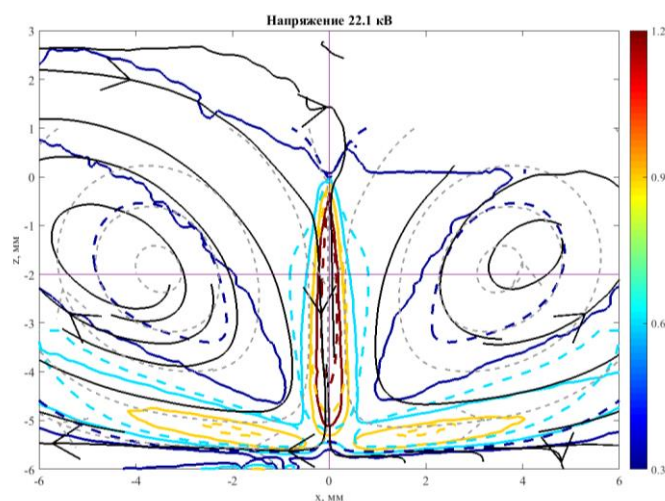


Рис.7.14 Экспериментальные (сплошные) и расчётные (пунктир) контуры скорости и линии тока жидкости, 22.1 кВ.

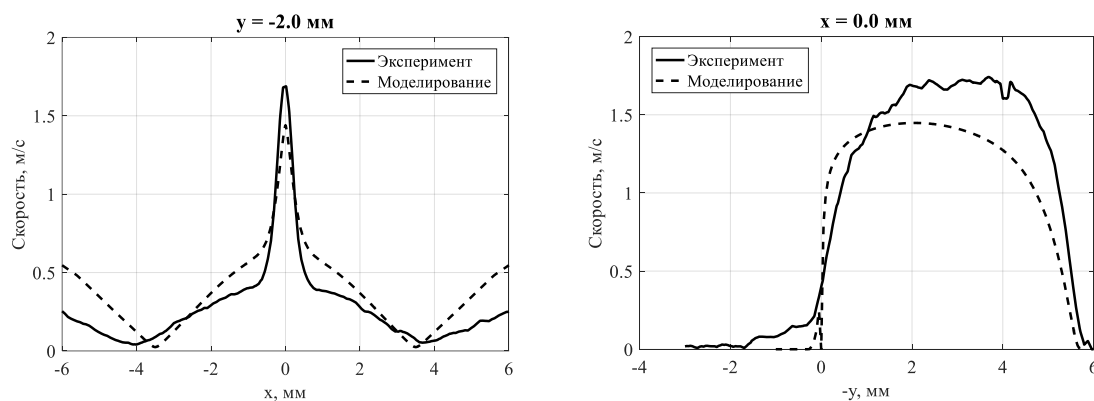


Рис.7.15. Профиль центральной струи в 2 мм от острия (слева) и распределение скорости в центральной струе (справа). Эксперимент (сплошные линии) и моделирование (пунктир), 22.1 кВ.

ЭГД-течения от отверстия в диэлектрическом барьере (сравнение моделирования и эксперимента[7.14]).

На рис.7.16 приведены контуры скорости (см/с) и линии тока жидкости: (а) эксперимент (в серой области удалось восстановить только линии тока), (b) моделирование.

Видно, что экспериментально зарегистрированная структура ЭГД-течения, описанная в главе 4, находится в хорошем качественном согласии с результатами компьютерного моделирования. При включении высокого напряжения в системе возникает сравнительно интенсивное ячеистое течение: в центральной области под отверстием жидкость подтекает к отверстию перпендикулярно барьеру, а затем растекается в стороны вдоль него, образуя линиями тока грибообразную шапку. Линии тока, полученные в эксперименте и компьютерном моделировании, близко соответствуют друг другу. Судя по характеру линий тока можно утверждать, что экспериментально зарегистрированное течение имеет зону ускорения в области нахождения объемного заряда, обусловленного эффектом Вина, т.е. по кольцу у внутренней границы отверстия. На рис. 7.16

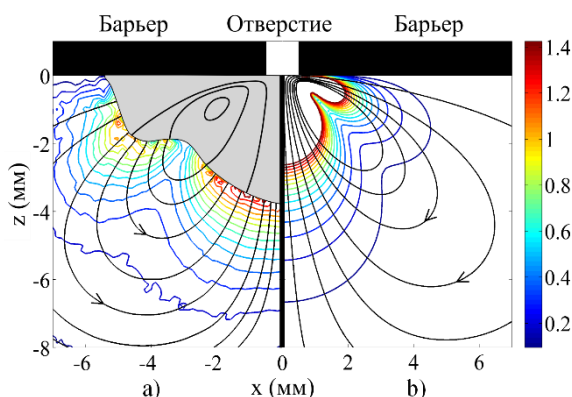


Рис. 7.16 Контуры скорости (см/с) и линии тока жидкости: (а), слева результаты эксперимента (в серой области удалось восстановить только линии тока), (b)- справа: моделирование.

представлено сравнение распределений скорости вдали от отверстия, полученных в эксперименте (левая половина графика) и в компьютерном моделировании (правая половина). В непосредственной близости от поверхности барьера и отверстия неоднородности скорости очень велики и направление вектора скорости быстро изменяется. Из-за этого на данном участке практически невозможно получить достоверные экспериментальные значения скорости (эта область заштрихована серым цветом), однако линии тока, всё же восстановлены. Характер линий уровня скорости в моделировании и эксперименте близко

соответствуют друг другу. Однако величины скоростей вне ближней зоны различны, причем различие двухкратное. Это, по видимому обусловлено неточной геометрией кромки отверстия в моделировании и эксперименте, а также не учетом в моделировании диффузионного приэлектродного слоя на поверхности барьера. Тем не менее, данное сравнение доказывает существования ЭГД-течений, вызванных исключительно эффектом Вина в областях далеких от поверхности электродов.

Выводы

Анализ результатов компьютерного моделирования ЭГД-течений диссоционного типа в различных системах электродов показал:

1. В случае течений диссоционного типа формирование объёмного заряда происходит непосредственно в объёме в области сильной неоднородности электрического поля, причём эта область может находиться как у поверхности электрода, так и на удалении от него.
2. В случае проявления эффекта Вина у заострённых электродов формируется биполярная зарядовая структура: к электроду примыкает неравновесный диссоционно-рекомбинационный слой гетерозаряда, а за ним за счёт неоднородности усиления диссоциации формируется слой гомозаряда. Из последнего формируются тонкие заряженные струйки ЭГД-течения, схожего по структуре с течением инжекционного типа.
3. В случае лезвиеобразного электрода наблюдается ЭГД-течение классической структуры с зоной квазиоднородного течения. При «длинном» трубчатом электроде из зоны повышенной диссоциации распространяются две противоположно заряженные струйки, ранее упомянутые структурные особенности сохраняются, но возникает дополнительная зона ускорения, струйки от торцевых поверхностей электрода стекаются в единую струю, текущую вдоль оси модели. Течение создает перепад давлений, подсасывающий жидкость из трубчатого электрода.
4. В случае трубчатого электрода слабо выступающего из диэлектрической пластины, из зоны повышенной диссоциации возникают две противоположно заряженные струйки, однако основная заряженная струйка, формирующая ЭГД-течение, распространяется вдоль поверхности диэлектрической пластины, что приводит к «аномальному» встречному течению. Это связано как с распределением электрического поля у поверхности диэлектрика, так и с действием Кулоновских сил в области повышенной диссоциации. Возникающий перепад давлений между трубчатым электродом и жидкостью меняет знак.
5. В системе с отверстием в диэлектрическом барьере, несмотря на отсутствие электродов в области повышенной диссоциации, вследствие схожего распределения электрического поля (максимум поля на краях отверстия) также возникают две противоположно заряженные струйки, причем основная струйка формирует течение, распространяющееся вдоль барьера и направленное на отверстие.
6. Исследование диэлектрического барьера с лезвиеобразным окончанием позволило реализовать и исследовать двух струйное симметричное ЭГД-течение диссоционного типа направленное на диэлектрическое лезвие и ускоряющиеся вдоль его поверхности.
7. Моделирование процессов диссоциации у поверхности барьера без использования условия равенства нулю нормальной компоненты поля на границе барьера показало

ло, что при малых значениях собственной проводимости жидкости у поверхности не сплошных диэлектрических барьеров, помещённых в диэлектрические жидкости, помимо тонкого диффузного заряженного слоя, могут формироваться неравновесный диссоционно-рекомбинационный слой или область заряда, обусловленная эффектом Вина, причём их размер зависит от величины проводимости и может быть существенно больше толщины диффузного слоя.

8. В предложенной системе реализуется два принципиально разных режима ЭГД-течения, реализованных за счёт двух различных механизмов образования заряда: эффект Вина при повышенной проводимости жидкости ($10^{-8} \div 10^{-9}$ См/м) и неравновесный слой, в котором нарушено равновесие между реакциями диссоциации-рекомбинации, при пониженной проводимости жидкости (10^{-11} См/м). В первом режиме течение направлено на барьер и вдоль его поверхности, во втором противоположно: вдоль поверхности барьера в его краю.
9. Последнее утверждение носит более общий характер и относится также к течениям инжекционного типа, реализующихся в жидкостях невысокой проводимости ($10^{-12} - 10^{-10}$ См/м) и течениям обусловленных эффектом Вина, реализующихся в жидкостях повышенной проводимости ($10^{-8} \div 10^{-9}$ См/м)

Фактором, определяющим структуру ЭГД-течения, в данной системе является безразмерный параметр P , равный отношению характерного времени миграции ионов вдоль барьера к времени релаксации соотношение между временем накопления заряда вблизи барьера, пропорциональным удельной проводимости жидкости, и временем переноса заряда вдоль барьера, пропорциональным подвижности ионов жидкости. Когда первое время меньше второго, заряд в диффузионном слое вблизи барьера успевает накопиться и почти полностью экранирует нормальную компоненту напряжённости электрического поля. Неравновесный диссоционно-рекомбинационный слой не успевает сформироваться. В противоположном случае время накопления заряда вблизи барьера в диффузионном слое настолько велико, что формируется и существует в установившемся режиме неравновесный слой. Объёмный заряд, появившийся в этом слое, уносится миграционным током, вызванным тангенциальной к поверхности барьера компонентой напряжённости электрического поля.

Литература к главе 7.

- 7.1 Стишков Ю.К., Чирков В.А. Неравновесные механизмы формирования приэлектродных заряженных слоёв в слабых электролитах при воздействии постоянного напряжения // Сборник докладов XI Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики", Санкт-Петербург (Россия), 29 июня – 3 июля 2015, 2015. – С. 211-215.
- 7.2 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. "Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках", Л.: Издат. Ленинградского университета, 1989, 174 с.
- 7.3 L. Onsager, "Deviations from Ohm's Law in Weak Electrolytes," J. Chem. Phys., vol. 2, no. 9, pp. 599–615, 1934.
- 7.4 Y. K. Stishkov, S. A. Vasilkov On Structure of Electrohydrodynamic Flows Caused by Field-enhanced Dissociation in Various System Configurations // Proceedings of XLV International Summer School – Conference APM 2017, 2017. – P. 429-438
- 7.5 Чирков В.А., Комаров Д.А., Стишков Ю.К., Васильков С. А. Численное и экспериментальное исследования ЭГД-течений вблизи поверхности твёрдого диэлектрика

- // Сборник докладов XI Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики", Санкт-Петербург (Россия), 29 июня – 3 июля 2015, 2015. – С. 122-126
- 7.6 V. A. Chirkov, S. A. Vasilkov, Yu. K. Stishkov The role of field-enhanced dissociation in electrohydrodynamic flow formation in a highly non-uniform electric field // Journal of Electrostatics, 2018. – Vol. 93, – P. 104-1099.
 - 7.7 S. A. Vasilkov, V. A. Chirkov, Yu. K. Stishkov Electrohydrodynamic flow caused by field-enhanced dissociation solely // PHYSICS OF FLUIDS, 2017. – Vol. 29, – № 6. – P. 063601
 - 7.8 V. A. Chirkov, Yu. K. Stishkov, S. A. Vasilkov PIV Investigation of EHD Flow Caused by Field-enhanced Dissociation // Proceedings of 10th Conference of the French Society of Electrostatics, 2016. – P. 1-4
 - 7.9 V. A. Chirkov, Yu. K. Stishkov, S. A. Vasilkov Characteristics of electrohydrodynamic pump of the dissociation type: low- and high-voltage ranges // Proceedings of 18th International Conference on Dielectric Liquids, ICDL 2014, Bled, Slovenia, 2014. – P. 1-5
 - 7.10 V.A. Chirkov, S.A. Vasilkov, Yu. K. Stishkov The Role of Field-enhanced Dissociation in EHD Flow Formation at Various Levels of Low-voltage Conductivity // Proceedings of International Symposium on Electrohydrodynamics ISEHD 2017, 2017. – P. 1-5
 - 7.11 Стишков Ю. К., Васильков С. А. Структура пристеночных слоёв на границе слабопроводящей жидкости и твёрдого диэлектрика // В сборнике: Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем. VI Всероссийская научная конференция с международным участием : сборник научных трудов. Министерство образования и науки Российской Федерации; ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». 2017. С. 143-149.
 - 7.12 S. A. Vasilkov, D. A. Nechaev, Yu. K. Stishkov Specifics of charge accumulation on and transport along the interface between a low-conducting liquid and a solid perfect insulator // Proceedings of XLV International Summer School - Conference APM 2017, 2017. – P. 473-483
 - 7.13 S.A. Vasilkov, V.A. Chirkov, Yu.K. Stishkov Study on high-voltage conductivity provided solely by field-enhanced dissociation in liquid dielectrics // Journal of Electrostatics, 2017. – Vol. 88, – P. 81-87
 - 7.14 V. A. Chirkov, D. K. Komarov, Y. K. Stishkov, and S. A. Vasilkov, “Comparative analysis of numerical simulation and PIV experimental results for a flow caused by field-enhanced dissociation,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 646, p. 12033, 2015.

ГЛАВА 8. ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА.

Попытки использовать основные свойства явлений, которые возникают в жидких диэлектриках при прохождении электрического тока в прикладных целях делались давно. По мере изучения электрогидродинамики (ЭГД) интерес к техническому применению результатов исследования этих явлений усилился. Это связано с технологической простотой этих устройств, их способностью работать в условиях невесомости, отсутствием движущихся и трущихся деталей: это разные ионно-конвективные насосы, ЭГД-генераторы, устройства автоматики и т.д. Техническое применение этих устройств «тормозилось» неполнотой и противоречивостью физических представлений о механизмах проводимости, зарядообразования в жидких диэлектриках и механизме развития ЭГД-течений.

Реальные конструкции ЭГД-насосов, довольно просты – они содержат корпус из изолирующего материала и систему электродов. Наиболее распространенной конструкцией ЭГД-насоса является система типа игла–кольцо, предложенная Штуцером и оказавшаяся, как будет показано далее, довольно неудачной. По мнению разработчиков, механизм работы этих конструкций насосов аналогичен работе соответствующих устройств в газах: у острия игольчатого электрода возникает аналог «короны», вызывающей направленное движение жидкости. Такая система должна работать в любой слабопроводящей жидкости, откуда и название ЭГД-насос, нередко с припиской «для перекачки слабопроводящих сред» [8.1,8.2].

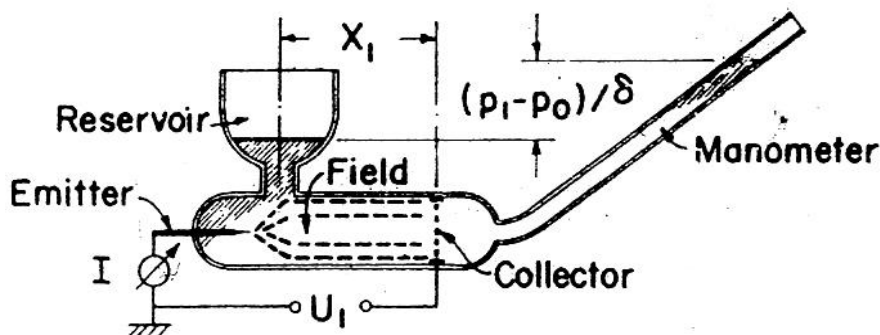


Рис. 8.1. ЭГДН в открытом гидравлическом контуре.

В 1959 году Штуцер [8.1] опубликовал эскизы ЭГД насосов для разомкнутого гидравлического контура (рис.8.1) и экспериментально доказал возможность создания избыточного давления таким течением, а значит и выхода течения жидкости за пределы межэлектродного пространства, обнаружив перепад давления на трубчатом манометре.

В 1960 году он построил такой же ЭГД-насос [8.2] в замкнутый гидравлический контур (рис.8.2), заполненный разного рода жидкими диэлектриками, и исследовал его работу в режиме циркуляции текущей среды по контуру.

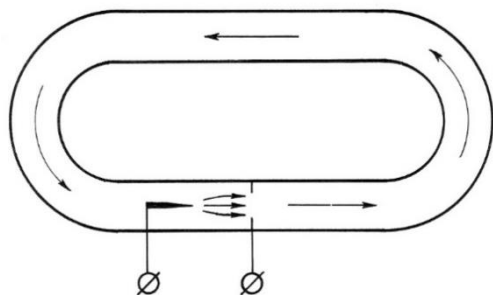


Рис. 8.2. ЭГДН в замкнутом гидравлическом контуре.

Преимущества ЭГД-насосов, в сравнении с механическими насосами, заключаются, прежде всего, в том, что они непосредственно преобразуют энергию электрического поля в механическую энергию жидкого диэлектрика. Они не имеют движущихся деталей, обладают свойствами многообразия конструктивных типов и форм исполнения адаптируются к обслуживаемым изделиям и их элементам, имеют малое гидравлическое сопротивление, легко управляются, имеют высокий эксплуатационный резерв работы, не требуют сложной технологии изготовления и дефицитных материалов [8.6-8.9].

Конструктивные особенности различных устройств обычно связаны с изменением формы и размещения электродов. Как будет показано далее, одна и та же конструкция ЭГД-насоса может совсем по-разному работать в жидкостях, различающихся составом примесей или материалом электродов. Детальное описание реальных свойств ЭГД-течений показывает, что в большинстве случаев течения реализуются в окрестностях межэлектродного промежутка, образуя внутренние вихри.

Как уже отмечалось выше, основной проблемой ЭГД-преобразования является получение однонаправленного движения среды во внешнем контуре. Как показали исследования, выведение ЭГД-течения за пределы межэлектродного промежутка представляет сложную задачу, для решения которой необходима информация о физике ЭГД-процессов.

Классический вид конструкции ЭГД-насоса [8.3-8.5] типа «лезвие – две параллельные пластины», разработанной автором, представлен на рис.8.3. Эта система является аналогом системы «игла – кольцо», но для повышения производительности и упрощения геометрии течения вместо игольчатого электрода использован лезвиеобразный электрод, установленный в держателе, покрытом диэлектриком (4), а вместо кольца – две параллельные пластины (7). Эта конструкция электрода показала высокую эффективность, т.к. в ней существенно неоднородно распределение интенсивности инжекции по поверхности электрода и в результате инжектирует преимущественно оконечность лезвия, а пробивная прочность конструкции также повышена, благодаря изоляционному покрытию стержневого держателя лезвия.

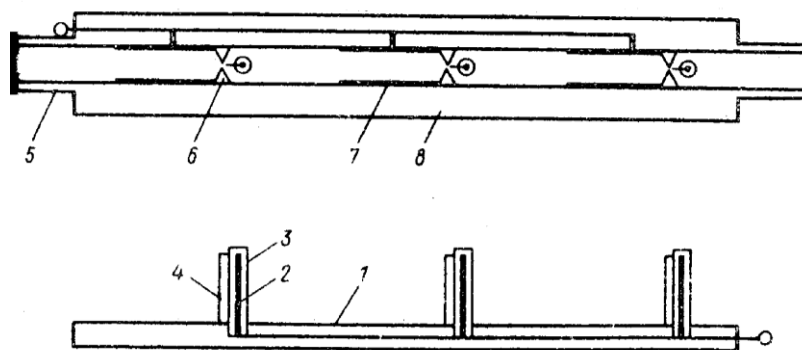


Рис. 8.3. Классический вид ЭГД-насоса типа «лезвие – две параллельные пластины».

Конструктивно насос выполнен в виде канала прямоугольного сечения (1,8) из плексигласа, в котором размещены три секции насоса, включенные, в зависимости от расположения и питания, последовательно – гидродинамически и параллельно – электрически. В предложенной конструкции эмиттерные и коллекторные электроды разделены коническими ограничивающими вставками (6) из плексигласа, предназначенными для устранения внутренних вихрей. Эмиттерные электроды укреплены на изолирующей пластине (5) при помощи медных штырей (2), изолированных полиэтиленовой трубкой (3). Лезвия (4) выполнены из режущей части бритвы и подпаяны к штырям. Эта конструкция учитывает неоднородное распределение поля вдоль поверхности активного электрода и усиливает его путем использования изоляции держателя полиэтиленовой трубкой. В результате удастся повысить электротехнические показатели ЭГД-насоса.

На рис.8.4 представлены в билогарифмическом масштабе зависимости статического давления, измеренные в увлажненном трансформаторном масле $\sigma_0 = 10^{-10}$ См/м (сплошная линия) и в смеси очищенного трансформаторного масла с йодом ($c = 10^{-4}$ г/см³) (пунктирная линия). Зависимости получены как для положительной, так и для отрицательной полярности напряжения, подаваемого на лезвиеобразные электроды. Видно, что с увеличением напряжения давление растет пропорционально квадрату напряжения. Весьма существенны полярные различия и их зависимость от состава и свойств среды, особенно ярко они проявляются в увлажненном трансформаторном масле.

Исследование модели ЭГД-насоса, построенной по аналогии с классическими образцами, показало, что ее расходные и статические характеристики существенно зависят от электрофизических свойств исследуемой жидкости. Наблюдение ЭГД-течений в изготовленной конструкции выявило возникновение интенсивных внутренних вихрей внутри каждой отдельной секции насоса и позволило установить, что скорость течения жидкости во внешнем контуре много меньше скорости течения во внутренних вихрях.

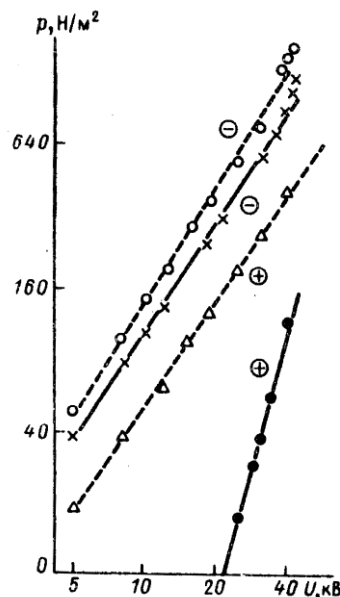


Рис. 8.4. Зависимость статического давления от подаваемого на электроды напряжения в увлажнённом трансформаторном масле (сплошная линия) и в очищенном трансформаторном масле с йодом (пунктирная линия) для разных полярностей подаваемого напряжения. Полярность обозначена знаком в круге.

ЭГД-преобразователи электрохимического типа [8.3].

Как известно, ЭГД-течение является следствием эффекта преобразования энергии движения ионов, т.е. электрического тока, в энергию механического движения среды. Электрический ток протекает лишь в пределах межэлектродного промежутка, а движение жидкости часто необходимо вывести за его пределы. Для этого следует устранить причины, способствующие замыканию течения между электродами. Одним из основных факторов является конфигурация силовых линий электрического поля внутри межэлектродного промежутка. На рис.8.5, а показана конфигурация силовых линий электрического поля в системе электродов «провод–два параллельных стержня» (аналог системы «игла–кольцо»), а на рис.8.5б – линии тока ЭГД-течения, соответствующего выбранной системе электродов.

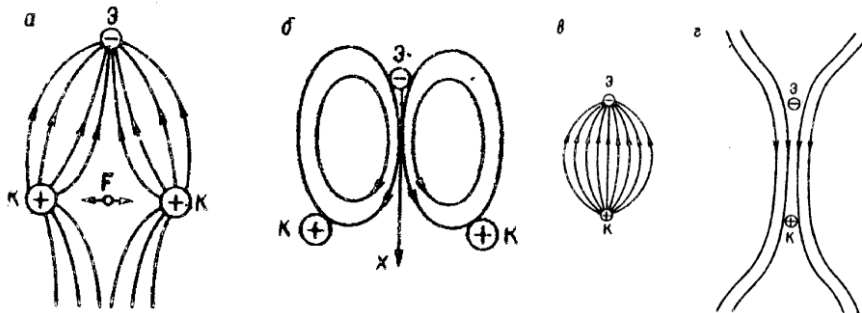


Рис.8.5. Силовые линии (а, в) и линии тока жидкости (б,г) в системах электродов провод–два параллельных стержня (а,б) и провод–проволока (в,г).

Элемент жидкости, получивший заряд у инжектирующего электрода (эмиттера), движется под действием сил поля вдоль оси, проходящей через середину промежутка между коллекторами. По мере продвижения к противозэлектродам на этот элемент будет действовать составляющая сил, нормальных к оси x , растягивающая жидкость к электродам $K-K$ (на рисунке показана стрелками). Под действием этой составляющей силы элемент получает ускорение в направлении, нормальном к оси x , центральная струя течения раздваиваются, образуя замкнутые ячейки внутри межэлектродного промежутка. Таким образом, система электродов «провод – два стержня» обладает расфокусирующим действием, способствующим образованию внутренних вихрей. Далее этот эффект исследован

более детально на примере компьютерного моделирования ЭГД-течений. Рас фокусирующее действие системы электродов «игла – кольцо» выражено еще сильнее.

Более удачной является система электродов «провод – провод». На рис.8.5, в, г изображена картина силовых линий поля в электростатическом приближении и картина тока ЭГД-течения. В этом случае электрическое поле обладает фокусирующим эффектом, т.е. течение концентрируется в направлении оси x . Поэтому в такой системе электродов устранены причины, способствующие образованию внутренних вихрей, что будет продемонстрировано далее.

В системах типа «игла – кольцо», «игла – сетка» определяющим является геометрический фактор: площадь коллектора существенно больше площади эмиттера. При работе с фокусирующей системой электродов учет этого фактора можно реализовать путем увеличения диаметра коллектора, но это существенно повысит его гидродинамическое сопротивление. Лучше всего для повышения эффективной площади коллектора использовать форму профилированного тела. Это, с одной стороны, позволит существенно увеличить площадь поверхности, контактирующей с жидкостью, а с другой – снизит гидродинамическое сопротивление. Кроме того, благодаря растянутой в направлении тока жидкости форме электрода обеспечивается увеличение времени контакта текущей жидкости с электродом, что также должно способствовать росту производительности насоса.

Как показали исследования, изложенные в главах 2-4, интенсивность зарядообразования, а, следовательно, и скорость ЭГД-течения существенно зависят от свойств границы электрод–жидкость. Было выявлено, что путем изменения состава и концентрации примесей в жидкости, а также изменением материалов электродов и их покрытия можно эффективно управлять не только скоростью, но и направлением ЭГД-течения, а также их структурой. Испытания классических конструкций ЭГД-насосов типа «игла – кольцо», «лезвие – пластина» также выявили определяющее влияние примесного состава жидкости на работу ЭГД-насоса.

Следуя этим данным, мы предлагаем ввести понятие «ЭГД-преобразователь», но не насос, т.е. понимать его как устройство для преобразования энергии электрического тока в энергию механического течения рабочей жидкости. При этом в качестве рабочей жидкости следует использовать не любую слабопроводящую жидкость, а обладающую определенным набором электрофизических и электрохимических свойств. Структура и направление ЭГД-течений обусловлены свойствами границы раздела электрод – жидкость, и, следовательно, электрофизические свойства жидкости, а также свойства смоченной поверхности электродов являются основными конструктивными признаками преобразователя.

В качестве простейшей опорной конструкции преобразователя можно использовать систему двух параллельных проводов в канале из диэлектрического материала. Эта система работает в режиме сквозной прокачки, например, при использовании в качестве рабочей жидкости трансформаторного масла с добавлением бутилового спирта.

Основные отличия ЭГД-преобразователя нового типа от традиционных конструкций ЭГД-насосов – это полное отсутствие геометрической асимметрии электродов, фокусирующее действие электродной системы, способствующее устранению внутренних вихрей, возможность использования электрохимической асимметрии, для получения прокачки. Электрохимическая асимметрия достигается либо использованием электродов, выполнен-

ных из различных материалов, либо использованием различных покрытий электродов, либо применением рабочей жидкости с полярными добавками. При прочих равных условиях интенсивность сквозной прокачки существенно зависит от концентрации полярных примесей. Так, например, при использовании медных проводов диаметром 0,3 мм на расстоянии 1 см максимальный эффект сквозной прокачки, достигается при применении в качестве рабочей жидкости 10%-го раствора бутилового спирта в трансформаторном масле. Если увеличивать или уменьшать содержание примесей, то сквозное течение переходит во встречное. При этом существенно снижается эффект сквозной прокачки.

Для выяснения роли материала электрода на характер ЭГД-течений была проведена серия экспериментов по изменению свойств границы электрод-жидкость путем изменения материала одного из электродов в симметричной системе из двух проволок диаметром 0,3 мм, длиной 29 мм, при межэлектродном расстоянии 0,4 мм. В качестве диэлектрической жидкости использовалось очищенное трансформаторное масло проводимостью 10^{-14} Ом⁻¹см⁻¹. Результаты исследований показали, что эффект сквозной прокачки имеет место при правильном выборе материалов пар анод-катод. Анализ критериев можно установить по анализу результатов компьютерного моделирования симметричных систем, что будет сделано далее.

Циклический ЭГД-преобразователь

Рассмотрим уравнение Бернулли: $\Delta p + \frac{\rho v^2}{2} - W_E = const$. Удельная электрическая энергия W_E преобразуется при работе ЭГД-преобразователя в кинетическую энергию движущейся жидкости и потенциальную энергию (давление в жидкости). В случае ЭГД-течений в свободном объеме основную долю в общем балансе составляет кинетическая энергия движущейся среды; при наличии диэлектрических каналов доля потенциальной энергии возрастает – в закрытом канале возникает существенный перепад давлений Δp на межэлектродном промежутке. В соответствии с этим, следует различать два типа ЭГД-преобразователей: динамические и статические. В динамическом ЭГД-преобразователе необходимо по возможности сильнее разогнать жидкость в пределах рабочего промежутка. Для этого требуется внешний контур с небольшим гидравлическим сопротивлением. Наилучшим образом эти условия реализованы в модели циклического ЭГД-преобразователя, выполненного в виде замкнутого канала, заключенного между двумя цилиндрическими стенками разных диаметров из диэлектрического материала.

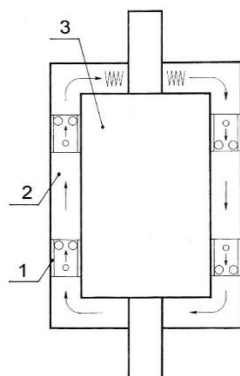


Рис. 8.6. Схема ЭГД-термостата: 1 – ЭГДН, 2 – теплоноситель, 3 – Объект охлаждения (термостатирования).

ЭГД-насосы могут быть использованы как для обслуживания удаленных объектов охлаждения, объединенных магистральным трубопроводом различной степени сложности, так и в приборостроении, где может возникнуть необходимость использовать локально-автономные системы охлаждения, непосредственно связанные с отдельным объектом.

В этом случае объект охлаждения окружают оболочкой (рис.8.6), которую полностью заполняют жидким диэлектриком-теплоносителем. В стесненных условиях щелевых каналов «гидравлической рубашки» ранее перечисленные свойства ЭГД-насоса, могут быть реализованы в полной мере. Эти свойства ЭГД-насосов были учтены при разработке объекта охлаждения (термостатирования) [8.6-8.8], в котором должна быть обеспечена независимость заданного интервала отклонения температурного поля от оптимального уровня при произвольно изменяющемся положении объекта в пространстве, находящемся под воздействием некоторого набора внешних возмущений.

На рис.8.7 представлен эскиз циклического ЭГД-преобразователя, разработанного сотрудниками лаборатории электрогидродинамики. По периметру канала попарно размещены электроды, на которые подается высокое напряжение от источника. Расстояние между разнополярными электродами 3–5 мм, расстояние между парами 3–5 см. В пределах каждой пары электродов жидкости разгоняются электрическим полем, вызывая общее течение жидкости по каналу циклического ЭГД-преобразователя. Последовательное включение пар может привести к увеличению общей скорости ЭГД-течения жидкости.

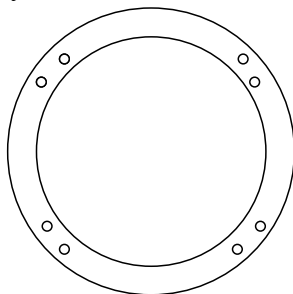


Рис.8.7. Эскиз циклического ЭГД-преобразователя

Предлагаемая модель циклического ЭГД-преобразователя предназначена для максимально возможного ускорения жидкости в пределах замкнутого контура, имеющего малое гидравлическое сопротивление. Преобразователь такого рода было предложено использовать вместо изображенного на рис. в системах интенсификации теплообмена электрическим полем между внутренней и внешней стенками канала.

Электродные системы циклического ЭГД-преобразователя разработаны на основе предшествующих материалов и представлены на фотографии (рис.8.8)

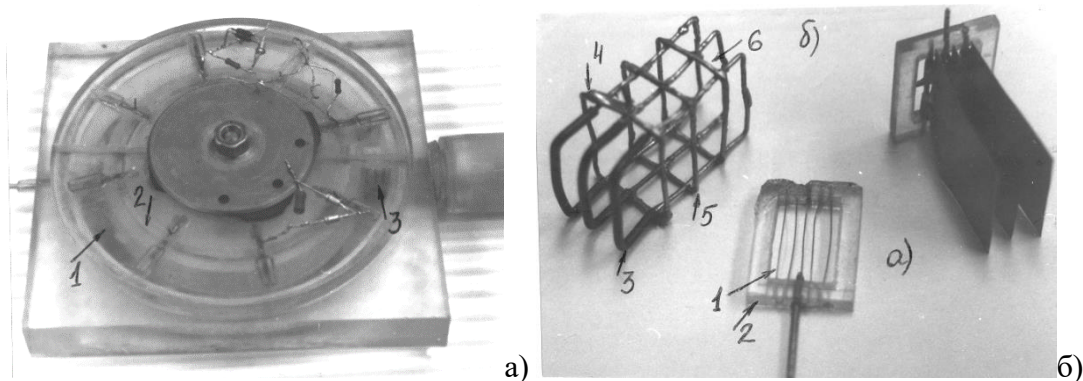


Рис.8.8. Фотографии циклического ЭГД-преобразователя: а – общий вид, б – элементы электродной системы.

Электрод-эмиттер (а на рис.8.8,б) состоит из пяти линейных проводов (1), натянутых на рамку-держатель (2) из оргстекла. Электрод-коллектор (б на рис.7.8,б) состоит из трёх проволочных рамок, передняя часть которых покрыта ПВХ-изоляцией. Далее по ходу канала расположена система оголенных проводов коллектора. Для обеспечения более полной нейтрализации протекающей жидкости на рамочные держатели (5), дополнительно натянута медная проволока (6). Представленная электродная система содержит дополнительный изолированный электрод (3), служащий для увеличения напряженности электрического поля в зоне разгона жидкости. Расстояние между параллельно включенными элементами активного электрода-эмиттера (активными алюминиевыми проволочками) выбрано оптимальным на основе предыдущих исследований и равно межэлектродному расстоянию ($l_p = l$). Хвостовая часть электрода-коллектора (б) содержит дополнительную сетку для более полного разряда протекающей жидкости.

На рис.8.9 представлены зависимости для пяти параллельно включенных секций с разными расстояниями между электродами: 8 – 8 мм, 9 – 4 мм. Зависимости $v(U)$ близки к линейным, имеется весьма слабая зависимость скорости от размеров межэлектродного промежутка. Увеличение числа параллельно включенных секций приводит к незначительному снижению скорости прокачки. Скорости сквозной прокачки сравнительно невелики, менее 1 м/с.

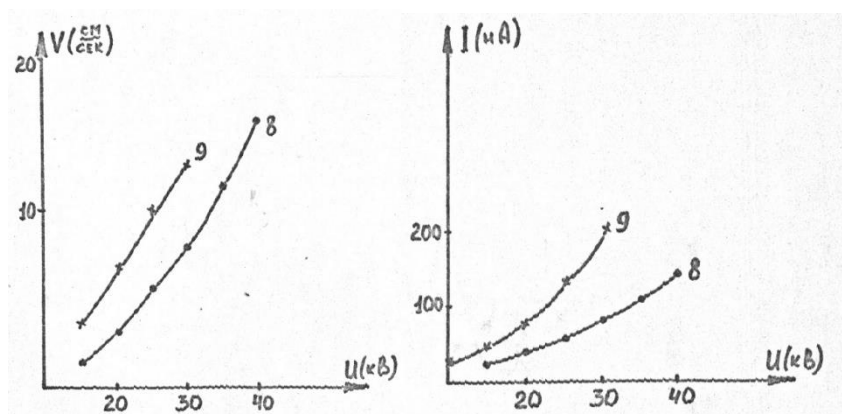


Рис. 8.9 Зависимость скорости и тока I-секционного ЭГД-насоса от расстояния между электродами (5-электродная сетка)

На рис.8.9 представлены зависимости скорости течения в канале, циклического ЭГД-преобразователя и тока от напряжения для одной (1), двух (2) и четырех (3) последовательно включенных секций. Видно, что увеличение числа секций приводит к некоторому

увеличению скорости, однако это увеличение непропорционально числу включенных секций, а значительно меньше.

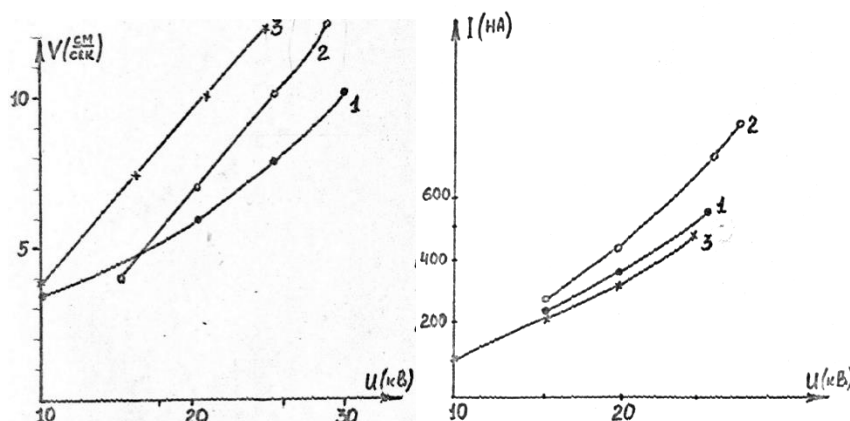


Рис. 8.10. Зависимость скорости ЭГД-течения (слева) в циклическом ЭГД-насосе и ток (справа) и напряжения: 1 – 1 каскад, 2 – 2 каскада, 3 – 4 каскада.

Одной из причин неаддитивной работы ЭГД-преобразователя может являться существенный снос заряда по ходу течения. В этом случае электрический заряд жидкости, поступающий во вторую и последующие ступени ЭГД-преобразователя, может снижать ускорение жидкости в последовательно включённых ступенях.

Компьютерное моделирование ЭГД-преобразователей инжекционного типа с симметричной системой электродов [8.10]

Рассмотрим ЭГД-преобразователь, система электродов которого состоит из одного активного и двух пассивных проволочных электродов одинакового диаметра, размещенных в щелевом канале с плоскими диэлектрическими стенками (рис. 8.11), ширина щели была выбрана равной 15 мм, длина – 30 мм. В таком канале задачу можно считать двумерной. На левый электрод (активный) подается потенциал +5 кВ, на оба правых (пассивных) – –5 кВ, расстояние между электродами $L = 10$ мм, расстояние в паре электродов $D = 5$ мм, радиус электродов 50 мкм. Эта система является аналогом системы типа игла-кольцо. Аналогия состоит в том, что центральная заряженная струйка от активного электрода распространяется вдоль оси, а поверхность пассивных электродов расположена на некотором отдалении D от оси течения. Это должно приводить, как было показано выше, к образованию внутренних вихрей, а, следовательно, к неэффективной работе преобразователя.

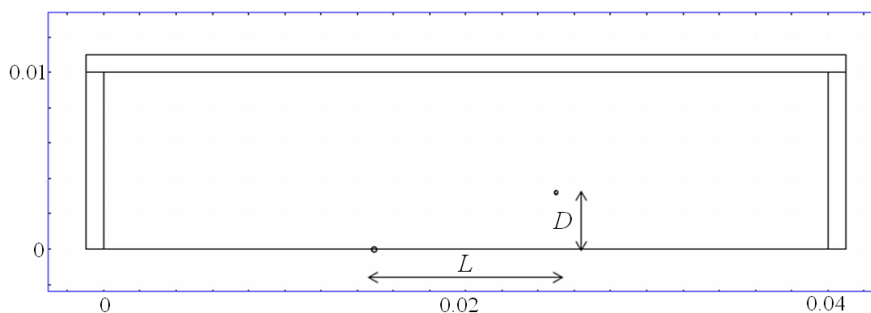


Рис. 8.11 Геометрия модели.

На рис.8.12а приведены результаты расчета: распределения заряда и силовых линий электрического поля в такой системе электродов при соотношении токов инъекции 3:1.

Ввиду симметрии модели приведены распределения только в верхней области кюветы. Видно, что от активного электрода распространяется одноименно заряженная центральная струйка (светлая), которая ускоряется в межэлектродном промежутке. На этом участке электрическое поле и электрические силы направлены к пассивным электродам и ускоряют жидкость вдоль плоскости симметрии модели. Когда заряженная центральная струйка попадет в промежуток между двумя пассивными электродами, то направление электрического поля меняется: силовые линии загибаются от плоскости симметрии к пассивным электродам. В этой области электрические силы приобретают нормальную к оси течения составляющую и приводят к изменению направления (дефокусировке) течения: раздвоению струи в направлении нормальном к оси. В области за электродами направление электрических сил изменяется на обратное к направлению течения жидкости. Под областью за электродами следует понимать область, расположенную вдоль плоскости симметрии течения. Под действием тормозящего эффекта осевая составляющая скорости течения резко падает и в заэлектродной области образуется застойная (светлая) зона, заряженная одноименно с активным электродом рис.7.12b. Эта зарядовая пробка мешает прохождению центральной струйки сквозного течения: она раздваивается огибают зарядовую пробку, и далее способствует образованию возвратных вихрей.

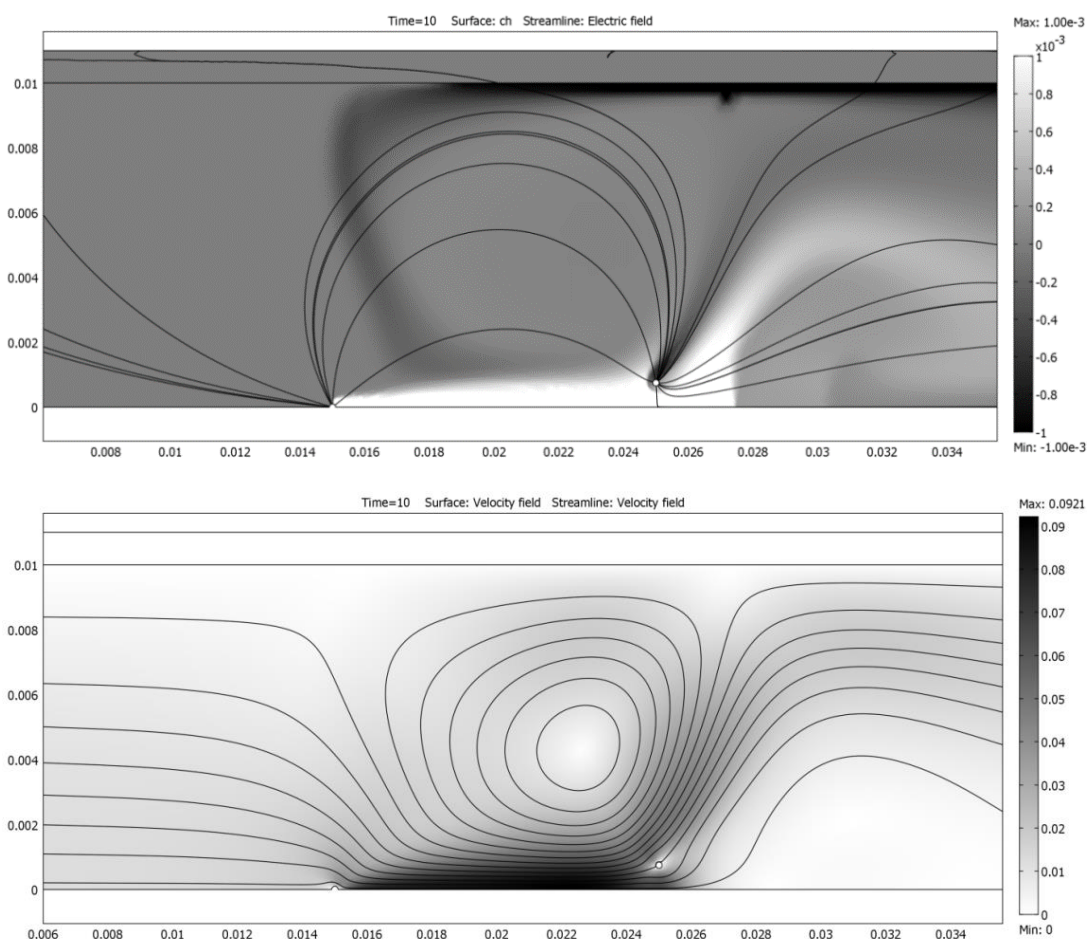


Рис. 8.12. а) распределение плотности электрического заряда и линии электрического поля. б) распределение скоростей и линии тока жидкости

Возвратные заряженные струйки, обтекая зарядовую пробку, достигают поверхности пассивных противо электродов. При наличии некоторого уровня инъекции с пассивных

электродов в жидкость инжектируется заряд противоположного знака, и струйка, обтекающая противоэлектрод, приобретает биполярную структуру. Поэтому электрические силы вновь приобретают составляющую, направленную слева направо, т.е. в направлении сквозного течения. Эти силы способствуют сквозной прокачке жидкости. В результате часть жидкости, контактировавшая с пассивным электродом и поэтому получившая от него противозаряд, огибая зарядовую пробку, протекает к задней части канала, а внешняя часть струйки, имеющая заряд одноименный с активным электродом, заворачивает обратно к активному электроду, образуя возвратный вихрь. На рис.8.12 а видна биполярная зарядовая структура сквозной и возвратной струек (чередование темной и светлой областей). Видна также зарядовая пробка (светлая) в заэлектродной области, лежащая у прямой D вдоль центральной оси течения (рис.8.12).

Моделирование показало, что эффект образования внутренних вихрей тем сильнее, чем дальше от плоскости симметрии расположены пассивные электроды. Для снижения эффекта дефокусировки необходимо размещать пассивные электроды непосредственно на оси течения. В этом случае целесообразно применять не пару, а всего один пассивный электрод.

Симметричная система электродов провод-провод.

Простейшим элементом сеточных электродов являются две параллельные проволоочки одинакового диаметра. В такой системе распределение электрического поля симметрично, поэтому, асимметрия, необходимая для организации сквозного течения в канале, может носить электрохимический характер. На рис.8.13 приведены результаты расчетов для симметричной системы электродов типа провод-провод, расположенных на центральной плоскости канала с диэлектрическими стенками. Как уже отмечалось ранее при правильном подборе коэффициентов «инъекции» (3:1) в канале реализуется режим сквозного ЭГД течения без образования внутренних вихрей. Совместный анализ результатов показал, что в такой системе зарядовая пробка практически не образуется, а сквозное течение реализуется в результате образования в заэлектродной области трехслойной (чередование светлой и темной областей) биполярной зарядовой структуры. Рассмотрим типичный результат численного решения системы ЭГД уравнений. Ширина канала здесь выбрана равной 1.5 см, расстояние между электродами – 1 см, отношение токов инъекций составляет 1:3. На рис.8.13 приведено распределение модуля скорости течения и линии тока жидкости:

На рис.8.13 представлена типовая кинематическая и зарядовая структура сквозного ЭГД-течения. На зарядовой структуре видно, что от активного электрода распространяется центральная струйка жидкости (темная), заряженной одноименно с активным электродом. В этом случае при подходе к пассивному электроду расфокусировки не происходит, поскольку силовые линии электрического поля в этой области направлены к противоэлектроду, концентрируя зарядовую струйку вдоль оси течения. Поэтому центральная струйка ускоряется вплоть до подхода к его поверхности. У лобовой поверхности пассивного электрода центральная струйка раздваивается и обтекает противоэлектрод вдоль его боковых поверхностей, образуя за ним две струйки, расходящиеся под острым углом. Однако в этом случае на поверхности пассивного электрода образуется заряд противоположного знака (светлый). Поэтому внутри струек, заряженных одноименно с активным электродом, распространяется внутренняя струйка, заряженная одноименно с пассивным электродом.

тродом. При этом противоположно заряженные струйки притягиваются, а результирующая электрическая сила направлена, как и ранее вдоль оси течения и не образует в заэлектродной области неподвижной зарядовой пробки. Именно эта «вафлеобразная» биполярная зарядовая структура и обеспечивает эффективный режим сквозного течения без образования внутренних вихрей.

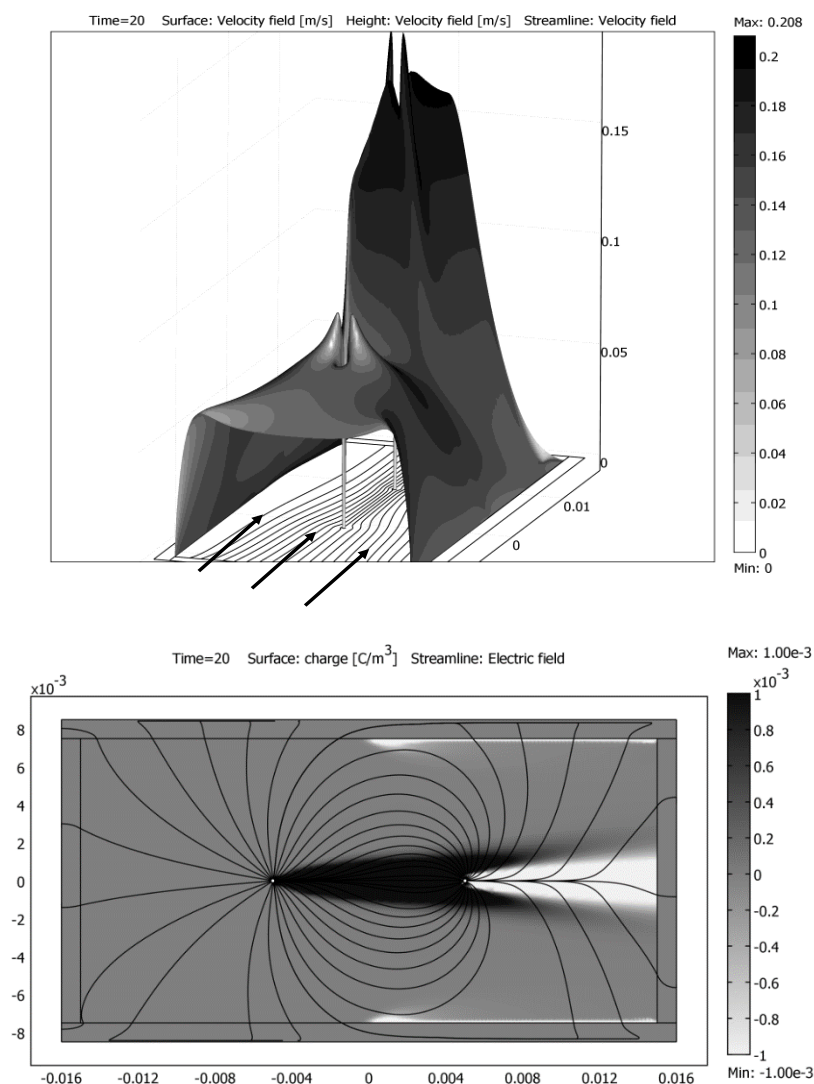


Рис. 8.13 Трехмерное распределение скоростей и линии тока центральной струи сквозного ЭГД-течения (сверху) и плотности электрического заряда и линий электрического поля (снизу) для системы провод-провод.

Итак, как было показано выше, что если в качестве пассивного противоэлектрода используются два электрода, то система получается «расфокусирующей» при этом в ней возникают внутренние вихри, которые уменьшают сквозную прокачку. В случае, когда мы переходим к симметричным системам электродов, то мы получаем эффективную сквозную прокачку без внутренних вихрей.

Фокусирующая система электродов

В качестве альтернативы расфокусирующей системе исследуем систему электродов два активных провода – один пассивный провод. Эта система противоположна предыдущей и обладает фокусирующим действием. Вертикальная компонента электрического по-

ля в области пассивного электрода направлена к оси течения. Поэтому следует ожидать усиление эффекта сквозной прокачки. Целью исследования было разработка фокусирующей системы электродов, приводящей к формированию сквозного ЭГД течения в заэлектродной области. А также проверить гипотезу о том, что фокусирующие системы электродов должны уменьшить количество энергии, затрачиваемой на трение.

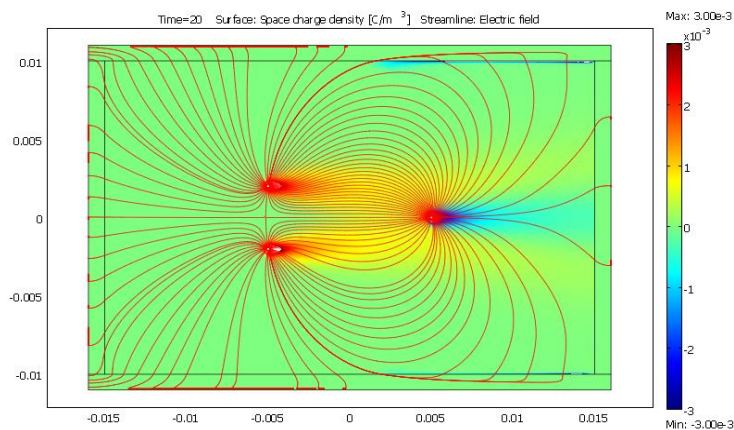


Рис. 8.14 Пространственное распределение плотности электрического заряда и линий электрического поля.

ний поля притягиваются друг к другу. За пассивным электродом эффект «фокусировки» усиливается, т.к. с его поверхности стекает и распространяется струйка заряженная одноименно с ним(светлая). На эту струйку электрическое поле оказывает ускоряющее, а не тормозящее действие. Поэтому за электродами, как и в случае симметричной двух электродной системы типа провод-провод распространяется вафлеобразная биполярная зарядовая структура, формирующая единую струю, текущую вдоль центральной оси. Результирующее действие электрических сил в заэлектродной области носит ускоряющий характер. Это приводит к значительному ускорению жидкости не только в пределах межэлектродного промежутка, но и за ним. Зарядовая пробка не образуется.

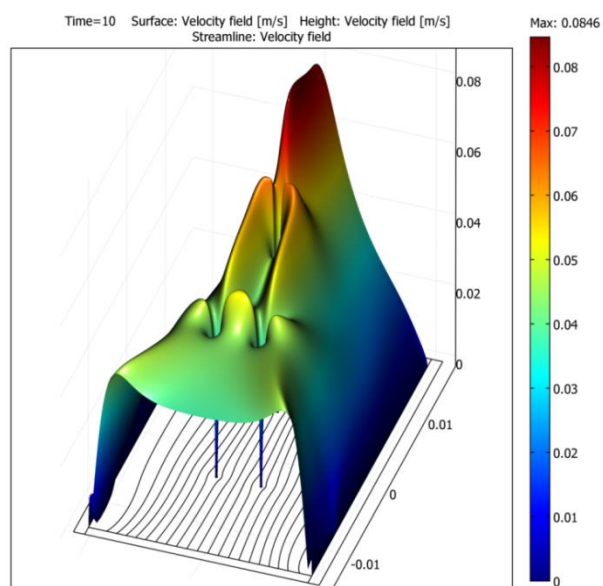


Рис. 8.15 Распределение скоростей и линий тока в системе

Рассмотрим для начала получившиеся распределения электрического поля и заряда в установившемся режиме для фокусирующей системы электродов: из графиков распределения заряда (рис.8.14) видно, что от пары активных электродов распространяются две одноименно заряженные(темные) струи, которые при подходе к противоэлектроду, благодаря стягиванию силовых ли-

На графиках распределения скоростей (рис.8.15) видно, что в пределах МЭП имеются две струи, которые благодаря взаимному притяжению за пассивным электродом формируют единый профиль и в заэлектродной области благодаря слиянию двух струй образуется единая биполярно заряженная струйка, которая существенно ускоряется. Из этого графика видно, что у нас сформировалось в системе сквозное течение без внутренних вихрей. Зарядовые струи на выходе из канала имеют выраженную слоистую структуру в пределах, которой происходит активная рекомбинация противоионов.

Отличительной особенностью этого типа течения является то, что за пассивным электродом мы видим не застойную зону,

как в случае расфокусирующей системы, а зону интенсивного ускорения, благодаря чему, эффект сквозной прокачки усиливается. Это объясняется, во-первых, тем, что за пассивным электродом образуется вафлеобразная биполярная зарядовая структура, которая интенсифицирует ускорение и позволяет уменьшить вынос заряда. Во-вторых, поскольку обтекание пассивного электрода двумя струйками происходит сбоку, то уменьшаются потери на лобовое обтекание противоиэлектрода.

Как мы и предполагали из анализа графика распределения электрического заряда и кулоновских сил, течения в этой системе имеют сквозной характер. Кроме того, можно отметить, что струя на выходе из канала шире, чем в случае системы провод-провод, т.е. выше расход. Структура зон ускорения в этой системе отличается от классической, здесь имеют две зоны ускорения в МЭП, которые сходятся у пассивного электрода, где и формируется максимальная скорость течения в системе

Следует отметить, что в отличие от течений в замкнутой кювете, здесь практически отсутствует зона торможения жидкости у пассивного противоиэлектрода, а зона ускорения занимает весь межэлектродный промежуток и более того-жидкость продолжает существенно ускоряться за его пределами. Последнее объясняется тем, что вблизи пассивного электрода происходит перезарядка жидкости. Таким образом, симметричная фокусирующая система электродов обеспечивает нам практически равномерное ускорение по всей длине межэлектродного промежутка, а также за пределами пассивного электрода. В конечном итоге, это приводит к значительному увеличению КПД сквозного течения. Система с двумя активными и одним пассивным электродами оказывается весьма эффективной, поскольку приводит к формированию вафлеобразной заряженной структуры за пассивным электродом, обеспечивающей эффективный вынос заряда из канала и препятствующий образованию зарядовой пробки на стенках канала.

ЭГД-насосы с асимметричным сильно неоднородным электрическим полем [8.11].

Наряду с симметричной системой электродов типа провод-провод был проведен цикл исследований по изучению влияния материала электродов на рабочие характеристики ЭГД-насоса с несимметричной системой электродов типа «игла в головке с коническим сверлением», далее игла-конфузор. Исследования проводились в статическом режиме, измерялось давление, развиваемое одиночной ступенью преобразователя.

Использовалась типовая экспериментальная установка, изготовленная на базе источника высокого напряжения специальной формы с использованием специальной кюветы и оригинального автоматизированного измерителя давлений. Измеритель давления измеряет и записывает на ленту самописца, либо в ЭВМ, давление, развиваемое одиночной ступенью ЭГД-преобразователя при одновременной записи вольтамперных характеристик. Экспериментальная установка представляет собой стенд, состоящий из высоковольтного блока, управляемого генератором, который задаёт линейно растущее, а затем спадающее напряжение, блока регистрации тока через кювету и блока видеоконтроля, который обеспечивает контроль за центровкой электрода-иглы и за наличие пузырьков воздуха в межэлектродном пространстве. Блок регистрации включает в себя самописец, либо ЭВМ, позволяющий фиксировать динамические вольтамперные характеристики и данные о давлении, развиваемом преобразователем. Высокоточный вольтметр В7-16А, фиксирует

Экспериментальная кювета представляет собой стакан, внутрь которого помещена одиночная ступень ЭГД-преобразователя (рис.8.16. Насос состоит из корпуса (4), сделанного из оргстекла, с отверстиями (5) для протока жидкости и двух электродов: игольчатого (1), закрепленного в винте-держателе (3) и цилиндрического с конусообразным сверлением (2), именуемого в дальнейшем «коническим». В коническом электроде высверлено отверстие (6) для протока жидкости и имеется выступ (7) для подсоединения трубки манометра типа ММ-1. Точность измерения давления составляет ± 4 мм Нг.

[illegible]

Как оказалось, на работу ЭГД-преобразователя оказывает существенное влияние ряд факторов. Величина давления и пробивная прочность во многом зависят от степени заточки иглы, точнее от угла заточки (рис.8.16). На разных графиках (рис.8.16) представлены зависимости давления от подаваемого напряжения $P(U)$ для разных материалов электродов-игл с разными углами заточки.

245

чаемому давлению) величина угла заточки иглы для каждого конкретного материала электрода-иглы.

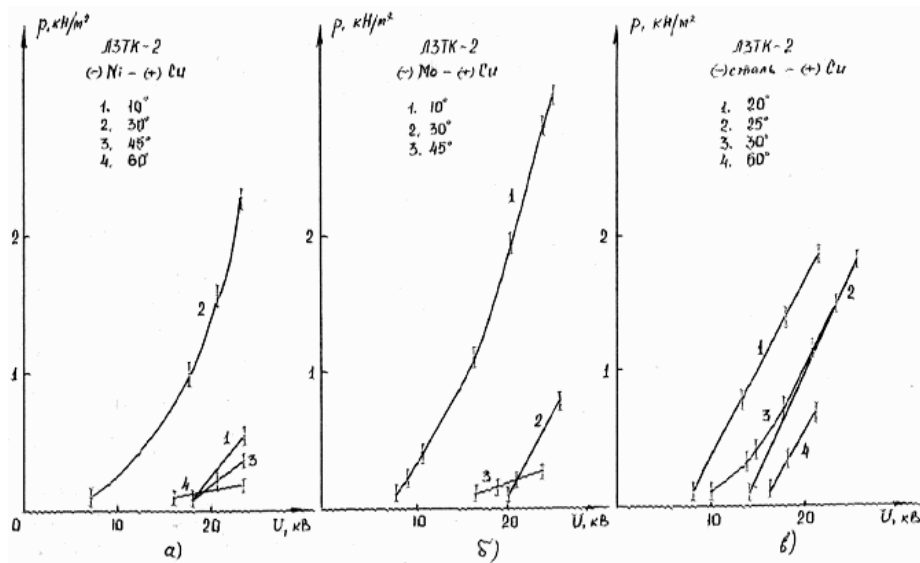


Рис. 8.17. Зависимости давления от напряжения на электроде-игле для игл из различных материалов и разных углов заточки.

Эффективность работы преобразователя существенно зависит от величины межэлектродного расстояния, точнее, от расположения кончика иглы относительно переднего края противоэлектрода. Действительно, уменьшение межэлектродного расстояния при поддержании одного и того же напряжения приводит, при прочих равных условиях, к уменьшению пробивной прочности системы. Увеличение межэлектродного расстояния, хоть и повышает пробивную прочность, однако напряженность у игольчатого электрода падает, что снижает эффект. Поэтому следует ожидать существования оптимального межэлектродного расстояния.

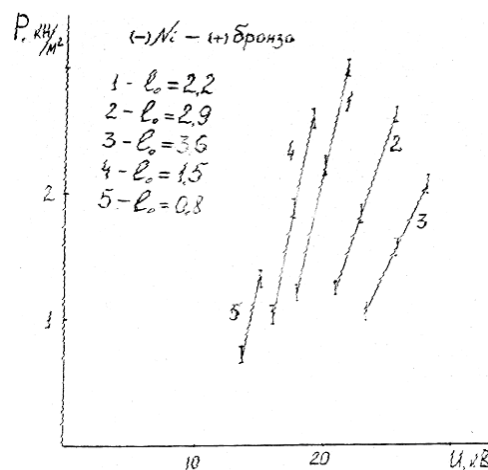


Рис. 8.18 Зависимости давления от напряжения при разных межэлектродных расстояниях l_0

На рис.8.18 представлены зависимости давления от напряжения при разных межэлектродных расстояниях l_0 . Видно, что при малых межэлектродных расстояниях, кривая (5) для $l_0 = 0.8$ мм, пробой наступает при сравнительно малом напряжении $U \sim 15$ кВ, при больших расстояниях, например, кривая (3) для $l_0 = 3.6$ мм, пробой наступает при напряжении $U \approx 36$ кВ, а эффект увеличения давления понижен. В то же время при $l_0 = 2.2$ мм (кривая (1)) пробивное напряжение составляет $U \approx 23$ кВ, а давление, развиваемое при та-

ком напряжении в 2 раза выше, чем при $l_0 = 0,8$ мм и на 30 % выше, чем при $l_0 = 2,2$ мм. Т.е. наблюдается оптимальное расстояние для указанной системы электродов.

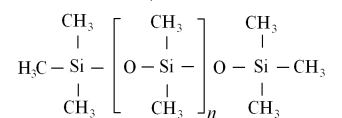
Отметим, что все эксперименты по изучению влияния материала электродов проведены при $l_0 = 1,4$ мм. Для изготовления игольчатых электродов использовались различные материалы с различными эмиссионными свойствами, в частности с различной энергией выхода электрона с поверхности в вакуум (табл.7.1).

Таблица 7.1.

Материал электрода	Ti	Nb	Ta	Al	Mo	Fe	Cu	Ni	W	Pd
Энергия выхода электрона в вакуум, эВ	3,95	3,99	4,12	4,25	4,3	4,31	4,4	4,5	4,54	4,8

Для противоиэлектрода-конуса использовались материалы Ti, Zn, Al, Fe, Cu, Cr. Чтобы избежать образования окисных пленок и загрязнения, электроды перед экспериментом очищались электрохимическим способом и хранились в изолированных от воздуха ёмкостях.

В качестве рабочей среды использовалась жидкость ПМС-1,5 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,4$ и удельной электропроводностью $\sigma_0 = 10^{-12}$ См/м, представляющая собой сложное кремний органическое вещество типа:



Это слабо полярная жидкость плотностью $\rho = 865$ кг/м³. Надо отметить, что хотя воздух слабо растворяется в этой жидкости, однако то его количество, которое в ней растворено, при подаче напряжения может приводить к образованию пузырьков и, соответственно, к пробоев межэлектродного промежутка. К понижению пробивного напряжения часто приводят частички пыли, осевшие на поверхности жидкости и внедренные затем в объём. Чтобы избавиться от них, в экспериментах, использовался специальный фторопластовый фильтр с диаметром пор не выше ≈ 1 мкм. Жидкость, предварительно отфильтрованную фильтром Шотки с диаметром пор не выше 10 мкм, прокачивали через фторопластовый фильтр с помощью форвакуумного насоса. Контроль чистоты жидкости после фильтрования проводился с помощью микроскопа, дающего увеличение в 200 раз путем отбора проб жидкости. В качестве подсветки использовался лазер ЛГ-15. Число частичек подсчитывалось в зоне оптического поля микроскопа. Проверка показала, что после разовой фильтрации ПМС-1,5 концентрация загрязнения существенно падает; в жидкости не остаётся частичек загрязнения размером больше 1 мкм. В исследованиях использовалась жидкость, удовлетворяющая описанным нормам. В качестве второй рабочей жидкости использовали изоктан $\sigma_0 = 10^{-12}$ См/м, $\epsilon = 1,6$, который подвергался такой же процедуре фильтрации.

Таким образом, эти серии экспериментов, поставленные в сильно неоднородных полях, свидетельствуют об определяющей роли в электрогидродинамических явлениях именно поверхностных процессов рождения и гибели ионов, а не объемных.

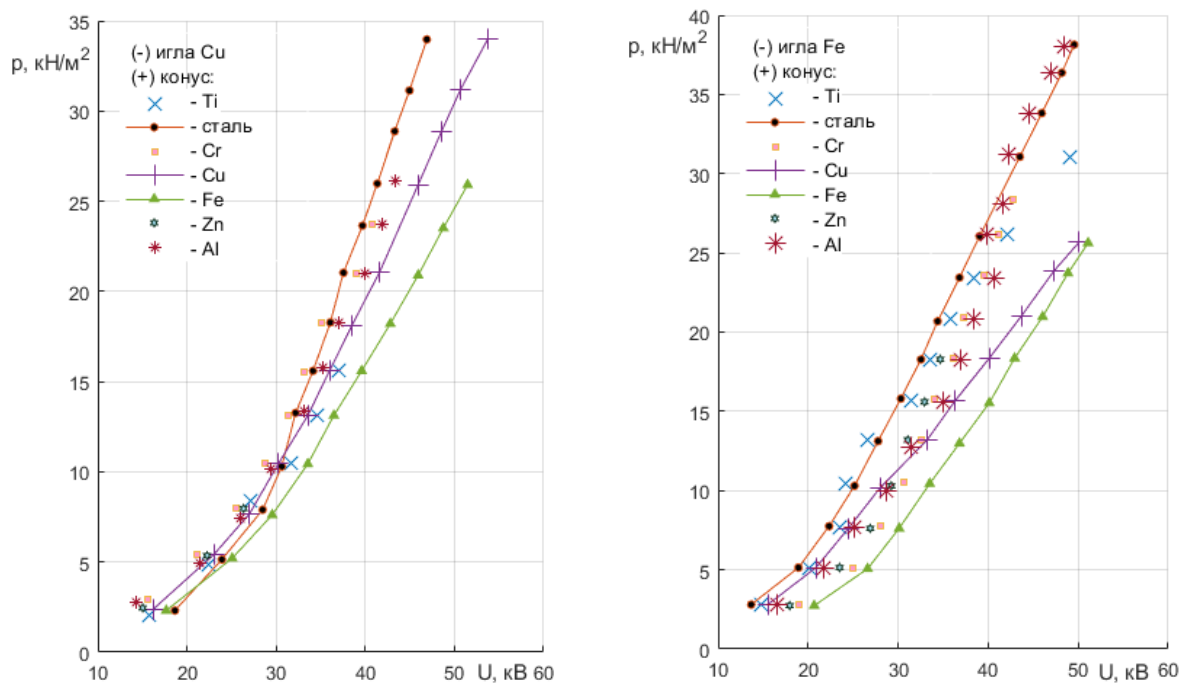


Рис. 8.19 Зависимости давления на выходе ЭГД-насоса с электродами игла-конфузор в ПМС-1,5R от напряжения для различных материалов положительного конфузора для иглы из меди(слева) и железа (справа).

На рис. 8.19 приведены зависимости давления от напряжения в ПМС-1,5 R для различных биметаллических пар электродов: (слева отрицательная игла-медь, справа отрицательная игла-железо). Межэлектродное расстояние 1,4 мм. Видно, что при изменении материала конфузора изменяется как вид зависимости $P(U)$, так и максимальное давление, развиваемое одиночной ступенью ЭГД-насоса. Следует обратить внимание, на высокую величину достигаемых давлений одиночной ступени ЭГД-насоса при оптимальном подборе материала пар игла-конфузор. Как видно из графиков существенное влияние на характер зависимостей $P=P(U)$ является не только материал иглы, но и конфузора.

Компьютерное моделирование ЭГД-насоса с сильно неоднородным полем [8.14].

В настоящем параграфе методика моделирования ЭГД-течений применена для изучения особенностей работы конкретных ЭГД-устройств – электрогидродинамических насосов с сильно неоднородным электрическим полем, создаваемым системой электродов типа игла-конфузор. Моделирование проведено на основе численного решения полной системы ЭГД-уравнений методом конечно элементного моделирования в пакете программ COMSOL.

Параметры конструкции модели ЭГД-насоса были взяты, наиболее близко соответствующие реальной конструкции (рис.8.20). Для этой конструкции результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 8.19, которые позволяют сопоставить данные компьютерного моделирования с экспериментом. Как видно из чертежа, модель осесимметрична. Диаметр головки игольчатого электрода был выбран, исходя из реальных размеров – 20 мкм. Длина межэлектродного промежутка в модели (≈ 2 мм) также соответствует аналогичному параметру реальной модели. Фактически, система электродов обра-

зована иглой и конфузуром, но т.к. радиус конуса много больше радиуса иглы, то у этой системы много общего с системой «игла-плоскость» из-за сходства степени неоднородности поля. Основное отличие в том, что система электродов представляет собой канал, открытый для сквозной прокачки жидкости, т.е. может работать, как ЭГД-насос с сильнонеоднородным полем. Угол раствора конусообразного электрода равен 45° .

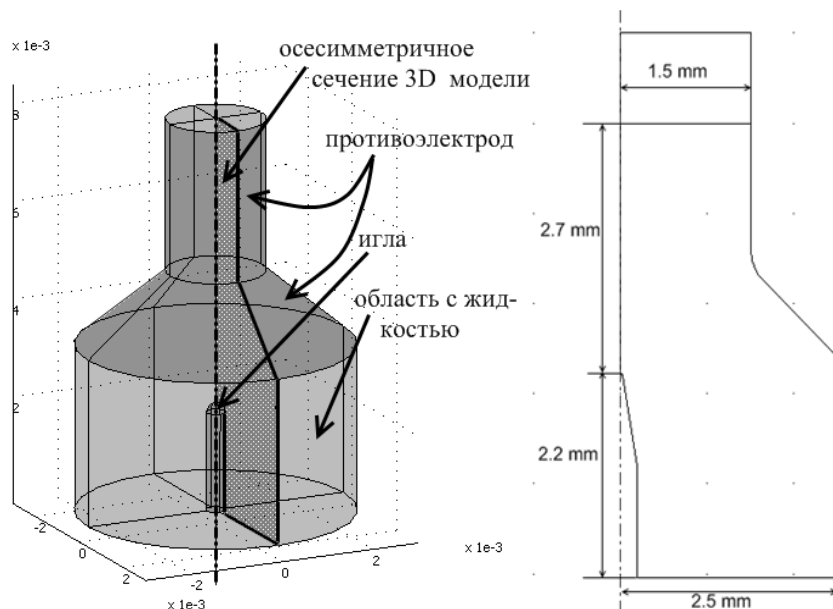


Рис. 8.20 Модель ЭГД-насоса.

В ходе расчета конечноэлементной модели решались полная система ЭГД-уравнений для случая слабой инжекции в непроводящую жидкость. Рекомбинация не учитывалась, т.к. предполагалось, что заряд в системе появляется только за счет процесса инжекции и гибнет при попадании на противоэлектрод или при вытекании из канала. В качестве граничных условий необходимо добавить функцию задающую поток инжекции заряда с поверхности иглы $J_n = F(|E|)$, о выборе которой будет сказано позднее.

Параметры рабочей жидкости соответствуют трансформаторному маслу: относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2.2$, механическая плотность $\gamma = 870 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\eta = 0.02 \text{ Па}\cdot\text{с}$, подвижность ионов $b = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

При решении использовался переходной тип анализа. Решение проводилось до момента получения стационарных распределений.

Рассмотрим граничные условия. Для уравнения Пуассона на игольчатом электроде задавалось постоянная разность потенциалов: V_0 – на игольчатом и нулевой потенциал – на конусообразном противоэлектроде. На стенках – условие $\vec{n} \cdot \vec{D} = 0$. На оси симметрии нормальная составляющая поля задавалась равной нулю. Изначально использовалось упрощенное условие $\vec{D} \cdot \vec{n} = 0$, но оно слишком строго в случае наличия в модели объемного заряда противоположного знака, появляющегося как следствие ошибки численного расчета (формально может возникнуть обратный ток на выходе насоса).

В качестве граничных условий для уравнения Навье–Стокса на стенках и электродах задавались условия прилипания $\vec{v} = 0$, на оси симметрии границе было поставлено условие отсутствия нормальной составляющей вектора скорости $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$. На границах обла-

стей подкачки и выхода задавалось условие $\eta \cdot \nabla \vec{v} \cdot \vec{n} = 0$. В модели присутствует несплавленный угол в области контакта боковой стенки и заземленного электрода. Его наличие не влияет на решение задачи, т.к. величины скоростей в этой области $|\vec{v}| \ll 1$. Это же можно сказать и о потоке заряженных частиц $|\vec{j}| \ll 1$.

Для уравнений, описывающих распространение заряда, в качестве граничных условий на стенках модели задавалось условие не проникновения заряда через стенку при помощи уравнения $\vec{j} \cdot \vec{n} = 0$. Для описания поведения заряда при попадании на поверхность противоиэлектрода и на границу выхода использовалось условие гибели заряда, которое соответствует процессу полного прохождения заряда через обозначенную поверхность. Это условие выполняется при помощи задания нормального потока заряда с поверхности выделенной границы по величине соответствующего нормальной компоненте полного потока заряда у поверхности границы, взятого с противоположным знаком $J_0 = \vec{j} \cdot \vec{n}$, где \vec{j} – вектор полного потока заряженных частиц (в объеме жидкости), а J_0 – поток заряда с поверхности выделенной границы. На оси симметрии, как и в остальных случаях, выбрано равенство нулю радиальной компоненты вектора потока заряда.

Функция инжекции:

$$J_n = (A \cdot E_n + B) \cdot \theta \left(E_n + \frac{B}{A} \right) \quad (8.1)$$

где $\theta \left(E_n + \frac{B}{A} \right)$ функция Хэвисайда, нужна для предотвращения появления отрицательного нормального потока заряда инжекции в случае, когда $A \cdot E_n + B < 0$. ($A = 3.3 \times 10^{-15} [\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \cdot \text{m}/\text{V}]$, $B = -1 \times 10^{-8} [\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$).

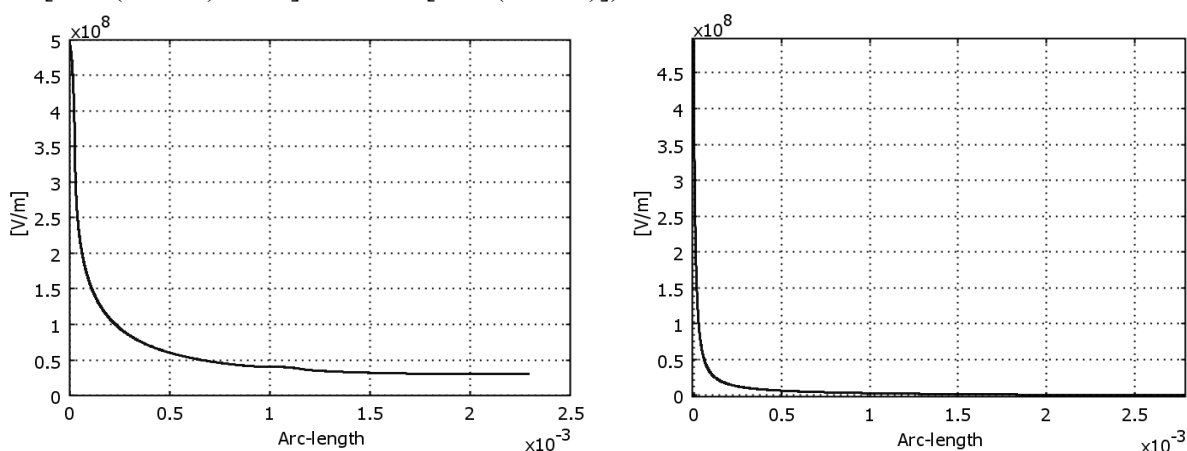


Рис. 8.21. Распределение нормальной компоненты поля вдоль боковой поверхности иглы (слева) и вдоль оси симметрии (справа).

Анализ результатов посвящен изучению типовой структуры ЭГД-течения в приведенной конструкции ЭГД-насоса и выявлению наиболее значимых в формировании ЭГД течения процессов. Решения получены и сравнивались при напряжениях между электродами 1, 2, 5, 10, 20, 30 кВ и фиксированном угле заточки 10° .

Электрическое поле является главной причиной возникновения ЭГД-течений. Оно определяет интенсивность процесса инжекции заряда с поверхности иглы, а также возникновение течения под воздействием кулоновских сил, поэтому изучение его распределения в модели даст ответы на достаточно важные вопросы, связанные с формой иглы, которые будут рассмотрены в дальнейшем. Для описания общей картины рассмотрим два линейных графика, представленных на рис №2.21.

Из левого графика видно, что поле вдоль поверхности иглы крайне неоднородно и принимает наибольшее значение на самом кончике, что легко объясняется наименьшим радиусом закругления в этой точке. Этот факт определяет существенно повышенную плотность тока инъекции с кончика иглы. При удалении от острия поле плавно падает и принимает почти постоянное значение вдоль боковой поверхности игольчатого электрода, что определяется постоянством радиуса кривизны в этой части. Следовательно, в случае слабой инъекции плотность тока инъекции, определяемая полем, также будет распределена неравномерно вдоль боковой поверхности игольчатого электрода. Из правого графика видно, что поле очень быстро падает при удалении от кончика иглы: поле падает на порядок на расстоянии порядка 0,1 мм.

Начнем рассмотрение с анализа поля скоростей в системе. На рис. 8.22 представлены распределения скоростей двух для характерных напряжений 2 и 20 кВ. В обоих случаях ЭГД-течение направлено вдоль оси и носит сквозной характер, внутренних течений, как в случае замкнутых систем типа игла-плоскость, практически не образуется. Это связано с тем, что поле в системе игла-конфузор, обладает фокусирующим действием. Однако структура ЭГД течений при малом и высоком напряжениях несколько отличаются друг от друга. При 2 кВ течение имеет неразвитый характер, максимум скорости находится под острием иглы, а далее скорость течения быстро падает. Это видно из линий тока жидкости, которые направлены под острым углом к оси течения в сторону противозэлектрода. При этом напряжении в области сужения противозэлектрода присутствует микро вихрь (выделен красной кольцевой линией). Приэлектродный вихрь оказывает отрицательное влияние на эффективность преобразования электрической энергии в энергию сквозной прокатки жидкости и КПД системы.

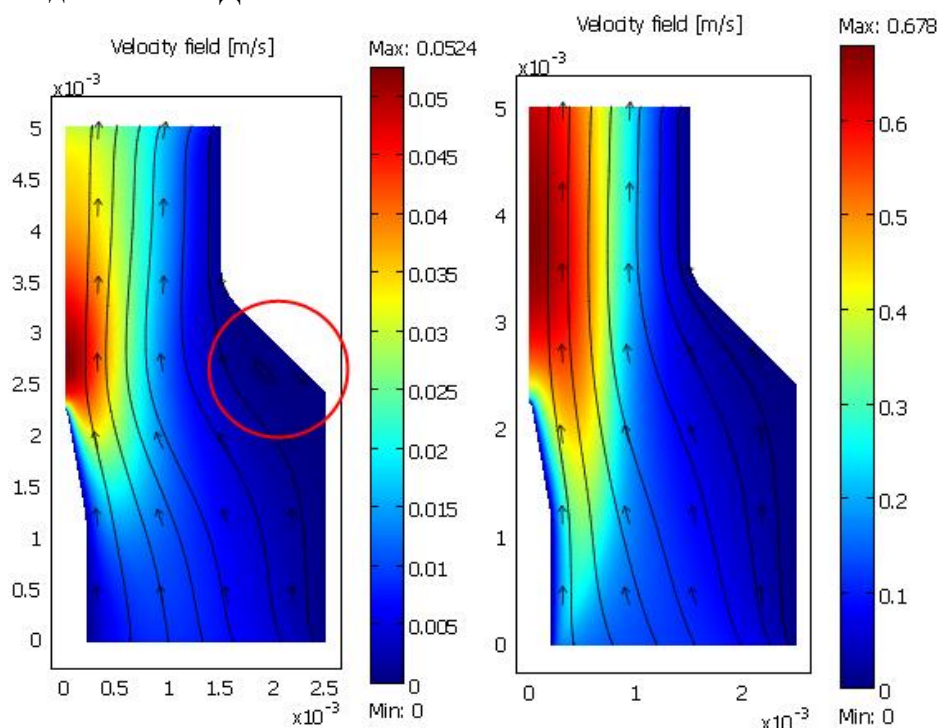


Рис. 8.22. Распределение скорости при напряжениях 2 (слева) и 20 кВ (справа).

Картина распределения скорости при напряжении 20 кВ имеет следующий вид: течение имеет сквозной ламинарный параллельно струйный характер, зона разгона составляет 1–2 мм, а далее следует зона однородного течения. Торможения жидкости в области

выходного отверстия не имеется. Линии тока жидкости параллельны центральной оси, отсутствует приэлектродный вихрь. Непосредственно у активного электрода имеется тонкий слой неподвижной жидкости, вытянутый вдоль всей боковой поверхности игольчатого электрода. Аналогичная неподвижная область более сложной формы имеется у поверхности противоэлектрода. Как видно из Рис. 8.22, жидкость на входе уже имеет некоторую ненулевую скорость. Это можно объяснить, если рассмотреть силы давления, $\vec{f} = -\nabla p$ действующие на жидкость, представленные на графике справа (рис. 8.23). Под игольчатым электродом имеется область разряжения. Поскольку под иглой давление существенно понижено, то сила градиента давлений подсасывает жидкость под игольчатый электрод.

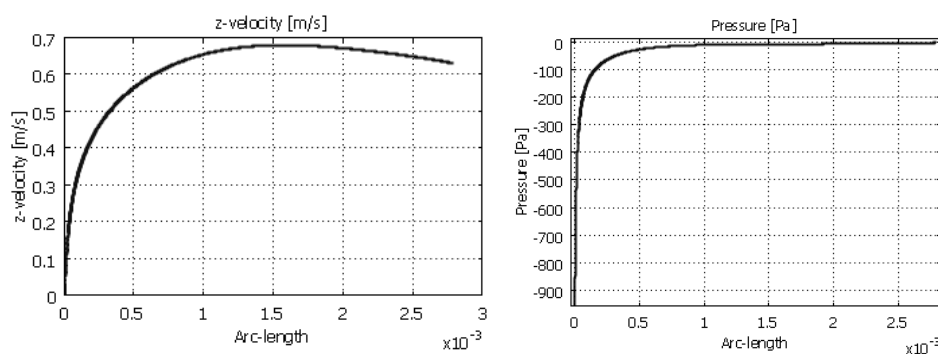


Рис.8.23. Распределение скорости (слева) и давления (справа) вдоль центральной оси при напряжении 20 кВ.

Из линейного распределения скорости и ускорения (рис. 8.23) видно, что жидкость разгоняется на промежутке длиной ≈ 1.5 мм. В дальнейшей области скорость несколько падает из-за воздействия на нее сил вязкого трения.

Выводы

- 1 В данном разделе при помощи компьютерного моделирования исследованы три типа ЭГД преобразователей: провод – два провода (расфокусирующая), провод – провод (симметричная) и два провода – провод (фокусирующая). Показано, что наихудшими свойствами обладает расфокусирующая система, поскольку в ней возникают внутренние вихри, которые ухудшают прокачку жидкости.
- 2 Рассчитана структура зарядовой пробки в т.н. расфокусирующих системах электродов, тормозящей сквозную прокачку жидкости.
- 3 Показано, что для устранения зарядовой пробки, необходимо размещать не два, а один противоэлектрод вдоль оси течения и подбирать примесной состав жидкости таким образом, чтобы инжекция шла не только на поверхности активного электрода, но и на поверхности пассивного. При этом в заэлектродной области образуется биполярно заряженная структура, компенсирующая возвратный тормозящий эффект.
- 4 Для усиления ускорения жидкости за пределами межэлектродного промежутка целесообразно использовать систему электродов, состоящую из двух активных и одного пассивного электрода, фокусирующую течение в центральной плоскости плоского канала.
- 5 Компьютерное моделирование ЭГД насоса с сильно неоднородным полем типа игла-конфузор показало, что рассмотренное устройство может эффективно работать в режиме инжекции.

- 6 Выявлены основные черты работы ЭГД-насоса с сильно неоднородным полем, работающего на основе инъекции. Показано, что структурные особенности и интегральные характеристики инжекционного насоса наиболее близко соответствуют результатам экспериментов с ЭГД-насосами типа игла-конфузор.

Лабораторная установка для электрораспыления диэлектрических жидкостей.

Демонстрационная установка для исследования работы ЭГД-насоса типа игла-конфузор, разработана автором [8.13, 8.15] и работает в ученой высоковольтной лаборатории НОЦ «Электрофизика». Установка позволяет получать и исследовать фонтан жидкого диэлектрика, создаваемый ЭГД-насосом. Высота фонтана и расход регулируется при помощи изменения напряжения, подаваемого на ЭГД-насос. Эффект распыления капель в фонтане исследуется студентами при помощи лабораторной установки (см. рис.8.24). Под действием электрических сил происходит распыление диэлектрической жидкости. Видеосистема для исследования электрического диспергирования слабопроводящей жидкости, позволяет производить видеозапись процесса диспергирования одновременно с измерением тока через жидкость и плотностью заряда, вводимого в нее.

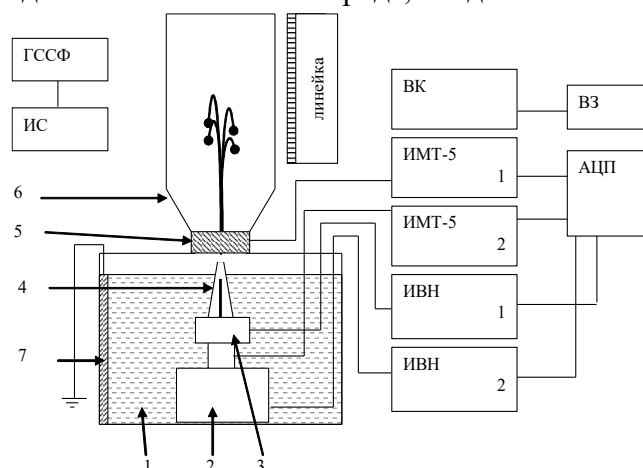


Рис. 8.24. Блок-схема экспериментальной установки для исследования электрического диспергирования слабопроводящей жидкости. 1 – кювета с жидкостью; 2 – ЭГД-насос; 3 – зарядное устройство; 4 – капилляр распылителя; 5 – металлическое кольцо для измерения тока переноса заряженной жидкости; 6 – колба; 7 – заземленная пластина; ИВН – источник высокого напряжения ЭГД-насоса (2) и распылителя (1); ИМТ-5 – измерители малых токов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВК – видеокамера; ВЗ – видеозахват; ИС - лазер; ГССФ – генератор сигналов специальной формы;

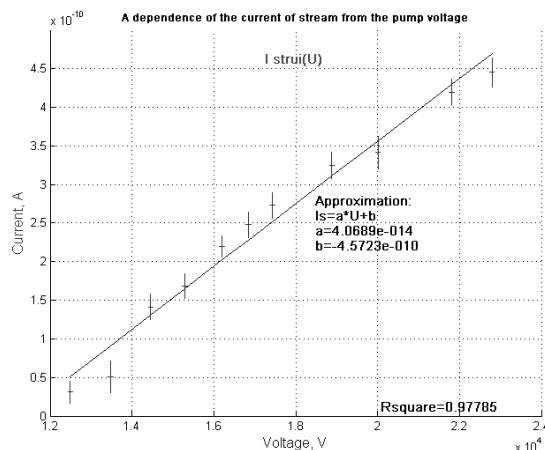


Рис. 8.25. Зависимость силы тока, вызванного переносимым объемным зарядом диспергируемой жидкости, от напряжения на ЭГД-насосе.

Для регулировки высоты фонтана на выходе ЭГД-насоса установлено дополнительное гидравлическое сопротивление в виде капилляра из полиэтилена. Поэтому из насоса выносится только часть заряда, полученного у игольчатого электрода. Для измерения выносимого заряда в колбе установлен дополнительный электрод. На рис. 8.25 приведена зависимость силы тока, вызванного объёмным зарядом, выносимым диспергируемой жидкостью в фонтан, от напряжения на ЭГД-насосе. С достаточной степенью достоверности ($R\text{-square} = 0,98$) полученный график можно аппроксимировать прямой.

Используя полученные значения для тока, и зная расход жидкости, можно рассчитать среднюю плотность заряда, выносимую в фонтан, соответствующая зависимость приведена на рис.8.26. Зависимость имеет тенденцию к насыщению при напряжении больше 20 кВ, значение предельной плотности объемной плотности заряда оставляет $\rho = (1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ Кл/м³.

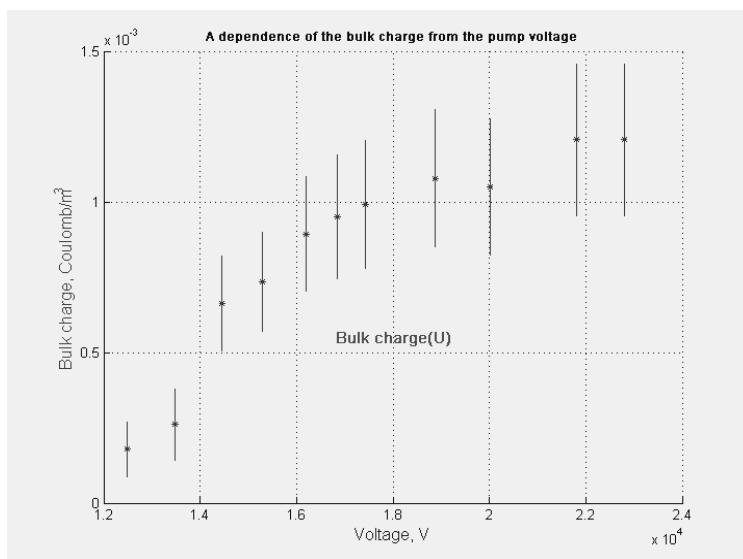


Рис. 8.26. Зависимость плотности объёмного заряда струи жидкости от напряжения на ЭГД-насосе.

Для определения распределения капель по радиусам производится видеосъемка работы ЭГД-фонтана. Полученное видеоизображение раскладывается в серию отдельных кадров (рис.8.27) для их последующей обработки.

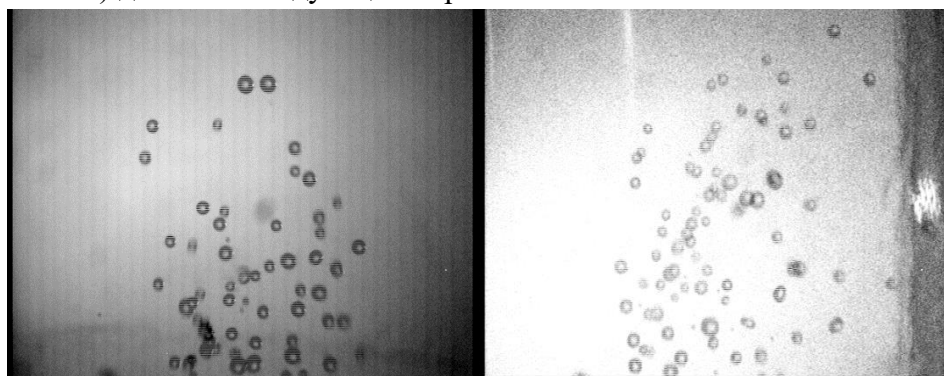


Рис. 8.27. отдельные кадры видеозаписи работы ЭГД-фонтана.

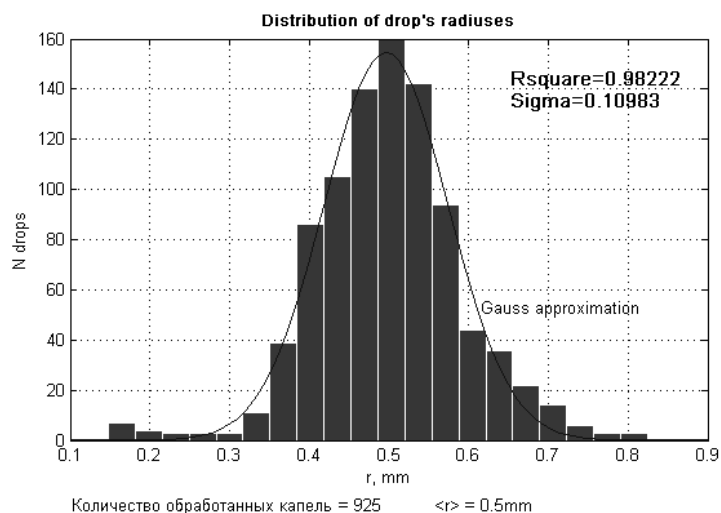


Рис. 8.28. Распределение капель по размерам

Далее производится обработка полученных кадров при помощи специальной программы, написанной на языке *MatLab*. Результат обработки выборочной серии кадров представлен на рис.8.28.

Выводы:

- 1 Обоснована концепция ЭГД-преобразователей электрохимического типа.
- 2 Приведены оригинальные конструкции ЭГД-преобразователей на лезвиеобразных электродах.
- 3 Предложена оригинальная конструкция ЭГД-преобразователей расхода на симметричных электродах, работающая на сбалансированной биполярной инжекции.
- 4 Исследованы расфокусирующие и фокусирующие электродные системы.
- 5 Рассмотрена конструкция ЭГД-преобразователя с сильно неоднородным полем.
- 6 Описана оригинальная лабораторная установка, создающая ЭГД-фонтан, позволяющая исследовать влияние заряда на распыление жидких диэлектриков.

Литература к главе 8

- 8.1 Stuetzer O.M. Ion Drag Pressure Generation. //J. Appl. Phys., 1959, Vol.30, № 7, p.984-994.
- 8.2 Stuetzer O.M. Ion Drag Pumps. //J. Appl. Phys., 1960, Vol.31, № 1, p.136-146.
- 8.3 Стишков Ю.К. ЭГД-преобразователи электрохимического типа // Вестн. Ленингр. ун-та, Сер.физ. 1984. №22 с.26-31.
- 8.4 Стишков Ю.К., Остапенко А.А., Макаров П.А, Электрогидродинамические преобразователи // Магнитная гидродинамика. 1982. №2, с.120-125.
- 8.5 Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. – Л: Издательство ЛГУ, 1989. 174 с.
- 8.6 Малахов А.В. Экспериментальное исследование ЭГД-термостата. //6-ое Всесоюзное совещание по электрической обработке материалов. Тезисы докладов. Кишинев, МССР, 1990, с.211-212
- 8.7 Malakhov A.V. The Effect of Time Factor upon the Stability Of Output Parameters of Electrohydrodynamic Converters. //Proceedings of 13-th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99). Nara, Japon,1999, p.156-159.

- 8.8 Малахов А.В. К вопросу о типах (классификации) электрогидродинамических насосов. //Доклады 5-ой МНК "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей." Санкт-Петербург, Россия, 1998, с.223-226.
- 8.9 Борисов В.А. Разработка и исследование ионно-конвекционного насоса со специальной формой коллектора. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук. Ленинград. 1989. 16 с.
- 8.10 Ашихмин И.А., Стишков Ю.К. Электрогидродинамические преобразователи инжекционного типа // Электронная обработка материалов, 2012. –Т. 48, – № 3. – С. 93-101
- 8.11 Грошев А.К., Михайлов С.А., Стишков Ю.К. Влияние свойств границы электрод-жидкость на высоковольтную проводимость жидких диэлектриков // Тезисы докладов III Межреспубликанского семинара, Гродно, 1992.
- 8.12 Стишков Ю.К. Ионизационно-рекомбинационный механизм зарядообразования // Докл. АН СССР. 1986. Т.288. №4.
- 8.13 Богданов В. Стишков Ю.К. Экспериментальное исследование ЭГД-распылителя. Сборник трудов конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». С-Пб, 1998, с.214-218.
- 8.14 Стишков Ю.К., Чирков В.А., Козуб В.А. Компьютерное моделирование и оптимизация электрогидродинамического насоса // Сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», Т. 4. Санкт-Петербург, 2010,с. 326-330.
- 8.15 Афанасьев С.Б., Стишков Ю.К. «Электрофизические процессы в жидкостях и газах» Том 4. ЭГД-устройства, Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург, 2007. 87с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении отметим основные фундаментальные научные и прикладные результаты, изложенные в монографии.

- Жидкие диэлектрики имеют собственную низковольтную «проводимость», как правило, образованную диссоциацией примесных молекул. Случайные примеси, формирующие ионный состав технической диэлектрической жидкости, могут содержаться в ничтожных дозах и не всегда идентифицируются.
- Установлен ряд примесей: йод, бутанол, альфа лейцин, существенно влияющих на уровень инжекции, а, следовательно, на высоковольтную проводимость. Основные результаты получены в очищенных жидких диэлектриках с примесями этой серии.
- Исследован характер ВАХ в широком диапазоне напряжений и широком классе жидких диэлектриков различной природы. Степень отклонения от линейности на высоковольтном участке существенно зависит от контактных свойств границы электрод-жидкость и определяется примесным составом и материалом поверхности ионообразующего электрода, что свидетельствует о преобладающей роли поверхностного ионообразования в приэлектродных реакциях. Основным механизмом высоковольтного зарядообразования в жидкостях с относительно невысоким уровнем низковольтной проводимости до 0,1 нСм/м является инжекция.
- Конкретизирован механизм инжекции и установлены факторы, определяющие ее характер. Инжекционный механизм высоковольтной проводимости существенно зависит от концентрации вводимых примесей. Зависимость инжекционного тока от концентрации примесей имеет участок насыщения. Инжекционный механизм реализуется как в сильно неоднородных, так и в слабо неоднородных полях.
- Разработан метод динамических вольтамперных характеристик (ДВАХ). Показано, что на высоковольтном участке ДВАХ в диэлектрической жидкости присутствует по крайней мере три, а может и четыре типа ионов: два типа ионов, образующиеся за счет самодиссоциации примесных молекул и один, или два типа ионов, образующихся в приэлектродных реакциях путем инжекции.
- При помощи оригинальной установки с системой плоских электродов и твёрдым диэлектрическим барьером с отверстием впервые установлена роль эффекта Вина в высоковольтном участке ДВАХ.
- Установлено, что в жидких диэлектриках возможно пять основных механизмов формирования объемного заряда.
- Электролитический (диффузионный) механизм. Этот механизм обусловлен появлением неоднородного распределения концентрации ионов при протекании электрического тока и является основным в сильных электролитах.
- Двойные приэлектродные слои. Возникают в результате самопроизвольного обмена ионами между электродом и жидкостью.

- Неравновесный диссоационно-рекомбинационный механизм, обусловленный нарушением равновесия между процессами локальной диссоциации и рекомбинации ионообразующих молекул, при протекании в жидкости электрического тока. Неравновесные слои возникают у поверхности электродов и твердых диэлектриков.
- Инжекционный механизм. Механизм связан с приэлектродным образованием ионов из примесных молекул. Этот механизм наиболее активно проявляется в жидких диэлектриках с относительно малым уровнем собственной проводимости и наличием в жидкости электронно-акцепторной(донорной) примеси.
- Электрокондуктивный механизм. Этот механизм связан с появлением в жидкости зон повышенной проводимости. Причиной появления этих зон может служить эффект Вина, либо локальный нагрев жидкости протекающим электрическим током.
- Показано, что ЭГД-течения в жидких диэлектриках могут иметь различные причины: ЭГД-течения, обусловленные неравновесными диссоационно-рекомбинационными процессами, т.н. течения проводимости, ЭГД-течения инжекционного типа и ЭГД-течения электрокондуктивного типа, например, обусловленные эффектом Вина. Все три вида течений зарегистрированы и исследованы.
- Разработан и всесторонне использован оригинальный метод визуализации ЭГД-течений при помощи мелких воздушных пузырьков, вводимых в жидкость при помощи специального капилляра.
- Получены и экспериментально исследованы поля скоростей ЭГД-течений инжекционного типа в несимметричной системе электродов в условиях ограниченных объемов. Установлен пороговый характер и два режима ЭГД-течений инжекционного типа. Исследованы структурные особенности этих течений в различных жидкостях в широком диапазоне напряжений и концентраций электронно-акцепторной примеси. Описана характерная зонная структура центральной струи ЭГД-течений и их Гауссов профиль.
- Предложены безразмерные интегральные характеристики ЭГД-течений: зависимость электрического числа Рейнольдса и приведенного тока от напряжения. Описана их взаимосвязь и физическая сущность, а также их вид в различных условиях.
- Получены и всесторонне исследованы ЭГД-течения инжекционного типа в симметричной системе электродов в условиях биполярной инъекции при различных концентрациях примесных молекул. Получено и всесторонне исследовано т.н. сквозное ЭГД-течение в замкнутом канале.
- При помощи компьютерного моделирования исследован процесс установления и формирования центральной струи ЭГД-течения инжекционного типа. Описаны механизмы формирования зонной структуры и Гауссова профиля центральной струи при инъекции в слабопроводящую жидкость.
- Описано влияние конвективного механизма переноса заряда на особенности амперсекундной и вольтамперных характеристик.
- Изучено влияние неравновесных диссоационно-рекомбинационных процессов на структуру центральной струи в условиях униполярной инъекции в слабопроводящую жидкость. Показано, что с ростом низковольтной проводимости инжестируемый заряд быстрее рекомбинирует в неравновесном слое и хуже проникает в

центральную струю ЭГД-течения. Это ограничивает действие инжекционного механизма в жидкостях повышенной проводимости.

- Всесторонне исследованы различные режимы ЭГД-течений инжекционного типа в симметричной системе электродов в условиях биполярной инжекции в рамках четырех ионной модели. Получены и исследованы структурные особенности этих течений в зависимости от уровней инжекции на электродах. Подробно исследовано т.н. сквозное ЭГД-течение, возникающее в каналах при различных уровнях инжекции на электродах. Описана зонная структура, Гауссов профиль центральной струи и зона рекомбинации встречных и сквозного ЭГД-течения.
- Изучен процесс формирования двух струйного ЭГД-течения электропроводящего типа из области повышенной проводимости находящейся вдали от электродов. Предложена и реализована оригинальная установка, позволившая впервые получить и исследовать ЭГД-течение обусловленное эффектом Вина из области повышенной диссоциации, находящейся вдали от электродов.
- Исследованы ЭГД-течения диссоционного типа от различных электродов (лезвия и трубчатого), а также от заостренной диэлектрической пластины(лезвия).
- Исследованы неравновесные диссоционно-рекомбинационные слои у поверхности барьеров из твердых диэлектрических материалов и обусловленные ими ЭГД-течения в жидкостях различной проводимости. Показано, что тип возникающих течений зависит от низковольтной проводимости жидкости и изменяется от течения проводимости до электропроводящего, обусловленного эффектом Вина, при увеличении проводимости до уровня 10 нСм/м.
- Рассмотрены различные типы ЭГД-устройств. Обоснована концепция ЭГД-преобразователей электрохимического типа и приведены два типа преобразователей: расхода на симметричной системе электродов и давления на несимметричной системе электродов.
- Приведен анализ причин, тормозящих сквозное течение в замкнутых каналах: зарядовые пробки и расфокусирующие системы электродов.
- Для усиления ускорения жидкости за пределами межэлектродного промежутка целесообразно использовать систему электродов, состоящую из двух активных и одного пассивного электрода, фокусирующую течение в центральной плоскости плоского канала.
- Выявлены основные черты работы ЭГД-насоса с сильно неоднородным полем, работающего на основе инжекции. Показано, что структурные особенности и интегральные характеристики инжекционного насоса наиболее близко соответствуют результатам экспериментов с ЭГД-насосами типа игла-конфузор.
- Приведена схема и описано действие лабораторной установки на основе ЭГД-преобразователя давления, создающей фонтан диэлектрической жидкости.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
SCIENTIFIC EDITION

Ю.К. СТИШКОВ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКОСТЯХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Монография

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЮСТИЦИНФОРМ»
юридическая, экономическая и деловая литература;
журналы «Право и экономика», «Вестник арбитражной практики»,
«Журнал предпринимательского и корпоративного права»

«YUSTITSINFORM» PUBLISHING HOUSE
legal, economic and business literature
magazines «Law and Economics», «Bulletin of arbitration practice»,
«Journal of Entrepreneurship and Corporate Law»

Главный редактор
В.А. Вайпан
Chief editor V.A. Vaypan

Генеральный директор
В.В. Прошин
CEO V.V. Proshin

Подписано в печать 20.01.2019.
Формат 60х84/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 30,63
Тираж 500 шт.

Signed in print 20.01.2019.
Format 60x84/8. Offset paper. Print. 500 copies.

Юстицинформ
119607, г. Москва, ул. Лобачевского, 94, оф. 7.
Тел.: (495) 232-12-42

Yustitsinform
119607, Moscow, Lobachevsky street, 94, office 7.
Phone number: (495) 232-12-42
<http://www.jusinf.ru> E-mail: info@jusinf.ru